

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СТРАТЕГІЯ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальностями: 142 «Енергетичне машинобудування»,
143 «Атомна енергетика», 144 «Теплоенергетика»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Назва: Навчальний посібник до виконання практичних занять по курсу «Стратегія охорони навколишнього середовища» [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності : 142 «Енергетичне машинобудування», 143 «Атомна енергетика», 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Д.В. Риндюк, Т.В. Шелешей, І.С. Беднарська – Електронні текстові данні (1 файл: 1,67 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 66 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.)
за поданням Вченої ради ТЕФ (протокол № 10 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

СТРАТЕГІЯ ОХОРОНИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

Укладачі: *Риндюк Дмитро Вікторович, канд. техн. наук, доц.
Шелешей Тетяна Вікторівна, асист.
Беднарська Інна Станіславівна, асист.*

Відповідальний
редактор *Побіровський Ю.М., канд. техн. наук, доц.*

Рецензенти: *Новаківський Є.В., канд. техн. наук, доц.
Притула Н.О., канд. техн. наук, доц.*

В навчальному посібнику розглянуті наступні теми: Паливо. Характеристики та властивості. Розрахунок валових викидів шкідливих речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, діоксиду сірки, оксидів азоту, оксидів вуглецю, важких металів, оксиду діазоту та метану. Визначення об'єму сухих димових газів. Перерахунок характеристик газоподібного палива.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальні дані	7
1.2. Установки, які включаються до Національного плану скорочення викидів.....	8
1.3. Установки, які не включаються до Національного плану скорочення викидів.....	9
Предмет, мета та завдання навчальної дисципліни.....	9
Практичне заняття 1. Паливо. Характеристики та властивості	10
Практичне заняття 2. Розрахунок валових викидів шкідливих речовин у вигляді суспендованих твердих частинок.....	10
Практичне заняття 3. Розрахунок валових викидів діоксиду сірки	22
Практичне заняття 4. Розрахунок валових викидів оксидів азоту.....	27
Практичне заняття № 5. Розрахунок валових викидів оксидів вуглецю CO_x	34
Практичне заняття 6. Розрахунок валових викидів важких металів.....	29
Практичне заняття № 7. Розрахунок валових викидів оксиду діазоту та метану...40	
Практичне заняття № 8. . Визначення об'єму сухих димових газів	46
Практичне заняття № 9. Перерахунок характеристик газоподібного палива.....	50
Список рекомендованої літератури.....	61
Додаток А. Склад і характеристики різних видів органічного палива.....	62

ВСТУП

Україною, як членом Енергетичного Співтовариства з 1 лютого 2011 року, прийнято зобов'язання дотримуватися положень Договору про заснування Енергетичного Співтовариства та додатків до нього. Згідно з Додатком II до Договору всі великі спалювальні установки після 31 грудня 2017 року мають відповідати вимогам Директиви 2001/80/ЄС про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин у повітря від великих спалювальних установок (далі – Директива 2001/80/ЄС).

Термін часу, що залишився до введення в дію вимог Директиви 2001/80/ЄС, поточний стан обладнання існуючих великих спалювальних установок в Україні, кількість яких перевищує 220, значний обсяг робіт та обмежені фінансові ресурси операторів, що обслуговують великі спалювальні установки, не дозволяють Україні вчасно виконати вимоги Директиви 2001/80/ЄС. Через недотримання вимог українського екологічного законодавства переважна більшість великих спалювальних установок має бути виведена з експлуатації, що призведе до зменшення наявних потужностей в національній енергетичній системі та зниження виробітку електричної і теплової енергії. Можливість для України тимчасового відступу від вимог Директиви 2001/80/ЄС (згідно зі статтею 4) шляхом впровадження Національного плану скорочення викидів має суттєве значення для енергетичної безпеки держави.

Директивою 2010/75/ЄС про промислові викиди (далі – Директива 2010/75/ЄС), що прийнята на зміну Директиви 2001/80/ЄС, внесено принципові зміни до чинного законодавства ЄС. Одна з найбільш важливих змін полягає у більш жорстких допустимих граничних значеннях викидів діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу від великих спалювальних установок. Ці вимоги набувають чинності в країнах ЄС для великих спалювальних установок з 1 січня 2016 року. При цьому країнам ЄС дозволяється застосування перехідного національного плану (стаття 32 Директиви 2010/75/ЄС) з пролонгацією строку досягнення деякими спалювальними установками вимог Директиви 2010/75/ЄС до 30 червня 2020 року.

Згідно з рішенням Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства від 24 жовтня 2013 року вимоги Директиви 2010/75/ЄС набувають чинності в Енергетичному Співтоваристві для великих спалювальних установок після 31 грудня 2027 року.

Загальні дані

На цей час в Україні працює 223 великі спалювальні установки (після групування на одне джерело викидів – димову трубу) загальною номінальною тепловою потужністю 115.894 ГВт. При цьому: 90 великих спалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 64.814 ГВт включено до Національного плану скорочення викидів, на яких планується забезпечити скорочення викидів забруднюючих речовин шляхом впровадження відповідних заходів; для 32 вугільних великих спалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 45.420 ГВт операторами надана інформація про заплановані заходи щодо зменшення викидів (вид заходу, термін впровадження); на 3 існуючих великих спалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 1.785 ГВт планується виконання вимог Директиви 2010/75/ЄС після 1 січня 2018 року; 135 існуючих великих спалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 46.880 ГВт планується вивести з експлуатації до 31 грудня 2033 року, з них: 17 існуючих вугільних великих спалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 15.118 ГВт планується вивести з експлуатації до 31 грудня 2033 року та замінити на нові вугільні спалювальні установки. 4 вугільні великі спалювальні установки номінальною тепловою потужністю 3.694 ГВт будуть виведені з експлуатації до 31 грудня 2023 року, для них буде встановлено обмежений час роботи протягом 20000 годин. Для інших 13 великих спалювальних установок номінальною тепловою потужністю 11.424 ГВт встановлюється обмежений час експлуатації у 40 000 годин до 31 грудня 2033 року; 13 газоспалювальних установок загальною номінальною тепловою потужністю 3.401 ГВт планується вивести з експлуатації до 31 грудня 2023 року і замінити на нові вугільні великі спалювальні установки. Для них буде встановлено обмежений час роботи протягом

20000 годин; для 41 великої спалювальної установки номінальною тепловою потужністю 22.373 ГВт до 31 грудня 2033 року встановлюється обмежений час експлуатації - 40000 годин; 58 газотурбінних установок загальною номінальною тепловою потужністю 4.088 ГВт, які отримали дозвіл на викиди до 27 листопада 2002 року, не включено до додатку 4 Національного плану скорочення викидів (згідно статті 1 Директиви 2001/80/ЄС), але їх планується вивести з експлуатації до 31 грудня 2033 року після 40000 годин роботи, починаючи з 1 січня 2018 року.

Установки, які включаються до Національного плану скорочення викидів

До Національного плану скорочення викидів на основі письмової заяви оператора, яка подається до центрального органу виконавчої влади, що відповідає за діяльність в рамках Енергетичного Співтовариства, до 30 червня 2016 року, включено 90 існуючих великих спалювальних установок номінальною тепловою потужністю не менше 50 МВт, яким було надано перший дозвіл на викиди до 1 липня 1992 року і на яких планується досягти нормативів гранично допустимих викидів для NO_x згідно з вимогами Директиви 2010/75/ЄС до 1 січня 2034 року та викидів пилу і SO₂ до 1 січня 2029 року.

Установки, які не включаються до Національного плану скорочення викидів

До Національного плану скорочення викидів не включаються нові спалювальні установки та існуючі спалювальні установки, оператори яких задекларували з 1 січня 2018 року дотримуватися нормативів гранично допустимих викидів для пилу, SO₂ і NO_x відповідно до вимог Додатку V Директиви 2010/75/ЄС.

До Національного плану скорочення викидів також не включаються існуючі спалювальні установки, оператори яких зобов'язалися в письмовій заяві, поданій до Міненерговугілля України, не пізніше 30 червня 2016 року експлуатувати такі установки загалом не більше 40000 годин у період з 1 січня 2018 року до 31

грудня 2033 року. По завершенню зазначеного обмеженого часу експлуатації спалювальні установки мають бути виведені з експлуатації.

До додатку 4 не включено великі спалювальні установки з обмеженим часом експлуатації газотурбінні установки, які отримали дозвіл на викиди до 27 листопада 2002 року (підпункт j пункту 7 статті 2 Директиви 2001/80/ЄС).

Предмет, мета та завдання навчальної дисципліни

«Стратегія охорони навколишнього середовища» – це курс, який допомагає отримати знання про шкідливі викиди в атмосферу від енергетичних установок, їх чисельний розрахунок, способи їх зменшення або запобігання тощо.

Вивчення дисципліни базується на знанні таких дисциплін: «Вища математика», «Фізика», «Інформаційні технології», «Хімія».

Отримані при вивченні дисципліни знання, уміння і навички використовуються в курсовому та дипломному проектуванні.

Предметом вивчення навчальної дисципліни є шкідливі викиди, які утворюються на енергетичних установках при спалюванні природного газу, мазуту, вугілля тощо; методика розрахунку основних числових значень валових викидів оксидів азоту, вуглецю, сірки, твердих частинок, важких металів, метану та діоксиду азоту.

Мета та завдання навчальної дисципліни. Метою цієї роботи є надання студентам практичних навиків розрахунку і визначення кількості викидів основних забруднюючих речовин, що надходять в атмосферне повітря з димовими газами, які утворюються під час спалювання органічного палива в енергетичних установках. Також, метою навчальної дисципліни є формування у студентів здатностей (компетентностей):

- формування та розвитку екологічного мислення і свідомості у майбутній професійній діяльності;
- формування глибоких екологічних знань і екологічної культури виховання розуміння сучасних проблем держави і світу;

- формування усвідомлення безперспективності технократичної ідеї розвитку і необхідності зміни її на екологічну, яка базується на єдності всього живого і не живого в системі гармонійного спів існування;

Основними завданнями вивчення дисципліни «Стратегія охорони навколишнього середовища» є вивчення теоретичних основ процесу спалювання органічного палива та виділення при цьому шкідливих речовин в атмосферу; засвоєння основних методик розрахунків, будови та принципу роботи, техніко-економічних характеристик обладнання.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

знати: заходи по забезпеченню діючих екологічних норм захисту навколишнього середовища.

вміти: визначати основні існуючі та перспективні екологічні проблеми планети та її регіонів; використовуючи закони охорони довкілля прогнозувати вплив науково технічного прогресу на довкілля; проводити екологічну експертизу та оцінювати природоохоронні заходи; аналізувати сучасні досягнення науки і техніки в даній галузі; проводити інноваційну науково-технічну політику; аналізувати, обирати та обґрунтовувати застосування оптимальних сучасних технологічних рішень, схем і обладнання; обирати і розраховувати технологічне і допоміжне обладнання підприємств галузі; аналізувати та обирати найбільш ефективні апаратурно-технологічні схеми екологічних установок;

мати навички: складати та удосконалювати принципові та технологічні схеми енерговиробництва, описувати будову та принцип роботи технологічного енергообладнання; розраховувати валові викиди NO_x , SO_2 , CO_2 , CO , N_2O , CH_4 тощо.

Під час спалювання органічного палива в енергетичних установках у атмосферне повітря разом з димовими газами надходять забруднювальні речовини та парникові гази. За цією методикою обліковуються такі забруднювальні речовини та парникові гази:

- речовини у вигляді суспендованих твердих частинок;

- оксиди сірки SO_x у перерахунку на діоксид сірки або сірчистий ангідрид SO_2 ;
- оксиди азоту NO_x у перерахунку на діоксид азоту NO_2 ;
- оксид вуглецю CO ;
- важкі метали та їх сполуки;
- діоксид вуглецю CO_2 ;
- метан CH_4 ;
- азоту (І) оксид або оксид діазоту N_2O .

Валові викиди забруднювальних речовин та парникових газів визначаються на основі:

- постійних вимірювань концентрацій забруднювальних речовин у димових газах енергетичних установок;
- розрахункових методів за даними про витрати та склад використаного палива і характеристики енергетичних та газоочисних установок.

Валові викиди інших забруднювальних речовин, (наприклад, неметанових летких органічних сполук, стійких органічних забруднювачів та ін.) будуть визначатись окремими нормативними документами.

Практичне заняття №1. Паливо. Характеристики та властивості.

Паливом називають складні органічні сполуки, при згоранні яких виділяється значна кількість енергії. За фізичним станом паливо розподіляють на рідке, тверде та газоподібне. До твердого палива відносять дрова, торф, вугілля, сланці, до рідкого - продукти переробки нафти: бензин, керосин; до газоподібного - природний та штучний газ. За способом одержання паливо розрізняють штучне та натуральне. Натуральне паливо зустрічається в природі у готовому для використання вигляді (дрова, торф, природний газ тощо). Штучне паливо отримують в результаті фізико-хімічних процесів, які здійснюються в промисловому виробництві (коксування кам'яного вугілля, крекінг нафти). Важливими характеристиками палива є: склад, теплота згорання, температура запалювання, вологість.

Елементарний склад твердого та рідкого палива можна визначити таким рівнянням: Хімічний аналіз палива показує, що воно складається з семи компонентів і його елементарний склад можна виразити формулою:

$$C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A + W = 100\% \quad (1.1)$$

де С – вуглець; Н – водень; S – сірка; N – азот; О – кисень; W – волога; А – зола.

Індекс "Р" означає робоче паливо, тобто паливо в тому вигляді, в якому воно поступає до топки.

Склад палива називають елементарним, тому що воно складається із окремих, не сполучених між собою елементів. Частина елементів палива являється горючим, частина - баластним. Найбільш цінними складовими палива є вуглець і водень, так як разом з частиною сірки вони є горючими елементами. Кисень служить окислювачем, знаходиться в з'єднанні з горючими елементами палива і тому зменшує його теплоту згорання. Азот палива є його інертною складовою, тому його включають в баласт.

Сірка може бути розділена на горючу і негорючу, відноситься до шкідливих складових палива з наступних причин. При горінні палива з сіркою виходить

двоокис сірки SO_2 , Частина якої окислюється, утворюючи вищий оксид SO_3 . При цьому в продуктах згоряння завжди є пари води, які утворюють з парами SO_3 пари сірчаної кислоти H_2SO_4 .

Зола палива складається з елементів, що утворюють негорючі мінеральні сполуки і золою прийнято вважати залишок, що утворився від прожарювання палива при 800°C .

Волога палива є небажаною домішкою, тому що не тільки зменшується вміст горючих елементів, але і на її пароутворення (яке обов'язково відбувається) витрачається частина теплоти згорання палива. Від вологи паливо звільняється при сушінні з температурою, трохи перевищує 100°C .

Складові та характеристики палива можуть бути перераховані на *робочу (raw), суху (dry) масу* (коли в паливі відсутня волога), *суху беззолну (dry ash-free)* або *горючу масу* (коли в паливі відсутня негорюча частина – зола та волога). У таблиці 1 наведено множники перерахунку масового вмісту складових палива на робочу, суху або горючу масу.

Таблиця 1.1 — Перерахунок масового вмісту складових палива

Маса	Початкове значення маси		
	робочої	сухої	горючої
Робоча	1	$(100 - W^r)/100$	$(100 - W^r - A^r)/100$
Суха	$100/(100 - W^r)$	1	$(100 - A^d)/100$
Горюча	$100/(100 - W^r - A^r)$	$100/(100 - A^d)$	1

Примітка. W^r – масовий вміст води в паливі на робочу масу, %;
 A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;
 A^d – масовий вміст золи в паливі на суху масу, %.

Крім елементарного складу до найважливіших характеристик палива відноситься теплота згоряння (вища і нижча). Вища теплота згоряння палива $Q_{\text{в}}^p$ - Кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні 1 кг палива за умови конденсації утворюються при згорянні парів води. У реальних умовах, наприклад при згорянні палива в котлі, намагаються не допускати конденсації водяної пари,

щоб уникнути утворення агресивної сірчаної кислоти. Тому на практиці користуються поняттям нижчої теплоти згорання палива Q_{it}^p - Це кількість теплоти, виділеної при повному згорянні палива за вирахуванням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в паливі. Теплота згорання різноманітних видів палива неоднакова, тому для співставлення різноманітних видів палива та вирішення питання про заміну одного виду палива іншим введено поняття "умовне паливо". Умовним називають таке паливо, теплота якого при згоранні складає 29,3 Дж/кг. Нижча теплота згорання розраховується за формулою Менделєєва:

$$Q_i^p = 339\tilde{N}^{\delta} + 1030\hat{I}^{\delta} - 108,8(\% \hat{I}^{\delta} - \% S^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг} \quad (1.2)$$

У таблиці 2 наведено формули перерахунку нижчої робочої теплоти згорання палива Q_i^r в нижчу суху теплоту згорання палива Q_i^d та нижчу горючу теплоту згорання палива Q_i^{daf} і навпаки.

Таблиця 1.2 — Перерахунок теплоти згорання палива

Теплота згорання	Початкове значення маси		
	робочої	Сухої	горючої
Q_i^r	1	$Q_i^d \frac{100 - W^r}{100} - 0,025W^r$	$Q_i^{daf} \frac{100 - W^r - A^r}{100} - 0,025W^r$
Q_i^d	$(Q_i^r + 0,025W^r) \frac{100}{100 - W^r}$	1	$Q_i^{daf} \frac{100 - A^d}{100}$
Q_i^{daf}	$(Q_i^r + 0,025W^r) \frac{100}{100 - W^r - A^r}$	$Q_i^d \frac{100}{100 - A^d}$	1

Примітка. Q_i^r – нижча робоча теплота згорання палива, МДж/кг;

Q_i^d – нижча суха теплота згорання палива, МДж/кг;

Q_i^{daf} – нижча горюча теплота згорання палива, МДж/кг;

W^r – масовий вміст води в паливі на робочу масу, %;

A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

A^d – масовий вміст золи в паливі на суху масу, %.

При неповному окисленні вуглецю палива в енергетичній установці величина Q_i^r фактично зменшується на величину енергії палива, що не догоріло, а саме:

$$Q_i^{r*} = Q_i^r - Q_c(1 - \varepsilon_c), \quad (2)$$

де Q_i^{r*} – нижча теплота згоряння палива з урахуванням механічного недопалу, МДж/кг;

Q_i^r – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

Q_C – теплота згоряння вуглецю, МДж/кг, $Q_C = 32,657$ МДж/кг;

ε_C – ступінь окислення вуглецю палива (формула (1.4)).

Під час спалювання палива можливе його неповне згоряння, у першу чергу механічний недопал, внаслідок чого до викидів твердих частинок та шлаку потрапляють горючі речовини, головним чином вуглець.

Масовий вміст вуглецю $C^{взг}$, який згоряє, % на робочу масу, виражається через масовий вміст вуглецю в паливі C^r за формулою

$$C^{взг} = \varepsilon_C C^r, \quad (1.3)$$

де ε_C – ступінь окислення вуглецю палива;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %.

Ефективність процесу горіння визначає ступінь окислення вуглецю палива ε_C . При повному згорянні палива ступінь окислення дорівнює одиниці, але за наявності недогоряння палива його значення зменшується. Ступінь окислення вуглецю палива ε_C в енергетичній установці розраховується за формулою

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{вин} \frac{\Gamma_{вин}}{100 - \Gamma_{вин}} + (1 - a_{вин}) \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} \right), \quad (1.4)$$

де A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ – частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи;

$\Gamma_{вин}$ – масовий вміст горючих речовин у виносі твердих частинок, %;

$\Gamma_{шл}$ – масовий вміст горючих речовин у шлаку, %.

Для природного газу рекомендоване значення ε_C становить 0,995, для мазуту – 0,99¹⁾. Вміст золи A^r в паливі та горючих речовин у шлаку $\Gamma_{шл}$ і викидах

¹ Викиди парникових газів. Підприємства Міненерго України. 1990 та 1999 роки. Ініціатива з питань зміни клімату, 2000 – 62 стор.

твердих частинок $\Gamma_{\text{вин}}$ визначається технічним аналізом палива (ГОСТ 27313—95), а також шлаку та твердих частинок, які виходять з енергетичної установки. Частка золи $a_{\text{вин}}$, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, залежить від технології спалювання палива. Вона визначається для енергетичної установки за паспортними даними та при проведенні її випробувань.

ЗАДАЧА №1

Розрахувати склад сухої та горючої маси палива та нижчу теплоту згорання для робочої, сухої та горючої маси за заданим складом

Склад у відсотковій масі						
H ^P	C ^P	S ^P	N ^P	O ^P	W ^P	A ^P
1,9	21,1	2,60	0,20	7,10	53,0	14,1

Розв'язання

Розрахуємо коефіцієнт переходу від робочої до сухої маси та коефіцієнт переходу від робочої до горючої згідно табл. 1.1:

$$K^{pc} = 100 / (100 - W^r)$$

$$K^{pc} = 100 / (100 - 53) = 2,13$$

$$K^{p\tilde{a}} = 100 / (100 - W^r - A^r)$$

$$K^{p\tilde{a}} = 100 / (100 - 53 - 14,1) = 3,04$$

$$\dot{I}^{\tilde{n}} = \dot{I}^{\delta} \cdot \hat{E}^{\delta\tilde{n}}$$

$$\dot{I}^{\tilde{n}} = 1,9 \cdot 2,13 = 4,04$$

$$\tilde{N}^{\tilde{n}} = 21,1 \cdot 2,13 = 44,94$$

$$S^{\tilde{n}} = 2,6 \cdot 2,13 = 5,54$$

$$N^{\tilde{n}} = 0,2 \cdot 2,13 = 0,426$$

$$O^{\tilde{n}} = 7,1 \cdot 2,13 = 15,12$$

$$A^{\tilde{n}} = 14,1 \cdot 2,13 = 30$$

100%

$$\dot{I}^{\tilde{a}} = \dot{I}^{\delta} \cdot \hat{E}^{\delta\tilde{a}}$$

$$\dot{I}^{\tilde{a}} = 1,9 \cdot 3,04 = 5,78$$

$$S^{\tilde{n}} = 21,1 \cdot 3,04 = 64,14$$

$$S^{\tilde{n}} = 2,6 \cdot 3,04 = 7,9$$

$$N^{\tilde{n}} = 0,2 \cdot 3,04 = 0,608$$

$$O^{\tilde{n}} = 7,1 \cdot 3,04 = 21,58$$

100%

Розрахуємо нижчу теплоту згорання (за формулою 1.2):

$$Q_i^{\delta} = 339\tilde{N}^{\delta} + 1030\dot{I}^{\delta} - 108,8(\hat{I}^{\delta} - S^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг};$$

$$Q_i^{\delta} = 339 \cdot 21,1 + 1030 \cdot 1,9 - 108,8(7,1 - 2,6) - 25 \cdot 53 = 7295,3 = 7,2953 \text{ МДж/кг};$$

Перерахуємо дану теплоту на суху та горючу маси за таблицею 1.2:

$$Q^c_H = (Q_i^r + 0,025 W^r) \frac{100}{100 - W^r};$$

$$Q^c_H = (7,295 + 0,025 \cdot 53) \frac{100}{100 - 53} = 18,34$$

$$Q^r_H = (Q_i^r + 0,025 W^r) \frac{100}{100 - W^r - A^r};$$

$$Q^r_H = (7,295 + 0,025 \cdot 53) \frac{100}{100 - 53 - 14,1} = 26,2$$

ЗАДАЧА №2

Склад горючої маси мазуту такий, %:

вуглець – 85,50;

водень – 11,20;

кисень – 0,80;

сірка – 2,50.

Нижча теплота згоряння горючої маси мазуту дорівнює 40,40 МДж/кг, вологість робочої маси палива — 2,00 %, зольність сухої маси — 0,15 %. Перерахувати елементарний склад та нижчу теплоту згорання мазуту на робочу масу.

Розв'язання

Для перерахунку складу палива на робочу масу застосовуються множники згідно з таблицею 1.1. Склад робочої маси мазуту такий:

- вуглець – $85,5 \cdot (100 - 2,0 - 0,15) / 100 = 83,66\%$
- водень – $11,2 \cdot (100 - 2,0 - 0,15) / 100 = 10,96\%$
- кисень та азот – $0,8 \cdot (100 - 0,2 - 0,015) / 100 = 0,78\%$
- сірка – $2,5 \cdot (100 - 2,0 - 0,15) / 100 = 2,45\%$
- зола – $0,15 \cdot (100 - 2,0) / 100 = 0,15\%$
- ванадій (V) – $333,3 \cdot (100 - 2,0) / 100 = 327,4 \text{ і } \tilde{a} / \hat{e}\tilde{a}$

Згідно з таблицею 1.2 теплота згоряння з горючої маси Q_i^{daf} на робочу Q_i^r перераховується за формулою:

$$Q_i^r = Q_i^{daf} \frac{100 - W^r - A^r}{100} - 0,025 W^r = 40,40 \frac{100 - 2,0 - 0,147}{100} - 0,025 \cdot 2,0 = 39,48$$

МДж/кг.

Також, до важливих характеристик відносяться в'язкість, температури застигання, спалаху і займання палива.

В'язкістю називається здатність рідини чинити опір здвигаючим зусиллям, тобто чим більше в'язкість рідини, тим вона менш текуча.

В'язкість частіше вимірюється в градусах в'язкості умовної ВУ - це відношення часу витікання 200 мл випробовуваної рідини через калібрований отвір діаметром 2,8 мм до часу витікання через той же отвір такої ж кількості води при температурі 20 ° С.

Температура застигання - температура, при якій паливо перестає текти. Для суднових палив діапазон температур застигання становить $-11^{\circ}\text{C} + 36^{\circ}\text{C}$, що пояснюється різним вмістом парафінів.

Температура спалаху - це мінімальна температура при якій пари рідкого палива спалахують при піднесенні відкритого полум'я, але саме паливо не запалюється.

Температурою займання називається температура, при якій після спалаху паливо спалахує з поверхні, і горіння триває не менше 5 сек.

Процес горіння палива оснований на хімічній реакції сполучення кисню повітря з горючими елементами палива. Внаслідок процесу горіння створюються нові продукти, які називаються продуктами згорання. Необхідною умовою горіння є нагрівання палива до температури загорання.

Практичне заняття №2. Розрахунок валових викидів шкідливих речовин у вигляді суспендованих твердих частинок

Валовий викид j -ї забруднювальної речовини E_j , т, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається як сума валових викидів цієї речовини під час спалювання різних видів палива, у тому числі під час їх одночасного спільного спалювання:

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i (Q_i^r)_i, \quad (2.1)$$

де E_{ji} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{ji} – показник емісії j -ї забруднювальної речовини для i -го палива, г/ГДж;

B_i – витрата i -го палива за проміжок часу P , т;

$(Q_i^r)_i$ – нижча робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Показник емісії речовини у вигляді суспендованих твердих частинок (далі – твердих частинок) визначається як специфічний і розраховується за формулою

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{\text{вин}} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} (1 - \eta_{\text{зу}}) + k_{\text{ТБС}}, \quad (2.2)$$

або

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \left(a_{\text{вин}} \frac{A^r}{100} + \frac{q_4}{100} \cdot \frac{Q_i^r}{Q_C} \right) (1 - \eta_{\text{зу}}) + k_{\text{ТБС}}, \quad (2.3)$$

де $k_{\text{ТВ}}$ – показник емісії твердих частинок, г/ГДж;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

Q_C – теплота згоряння вуглецю до CO_2 , яка дорівнює 32,68 МДж/кг;

q_4 – втрати тепла, пов'язані з механічним недопалом палива, %;

$\eta_{\text{зу}}$ – ефективність очищення димових газів від твердих частинок;

$\Gamma_{\text{вин}}$ – масовий вміст горючих речовин у викидах твердих частинок, %;

$k_{\text{твS}}$ – показник емісії твердих продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки і твердих частинок сорбенту, г/ГДж.

Вміст золи A' в паливі та горючих у викиді твердих частинок $G_{\text{вин}}$ визначаються при проведенні технічного аналізу за ГОСТ 11022—95 (ISO 1171—81) палива і леткої золи, яка виходить з енергетичної установки, відповідно.

Зола палива виходить з енергетичної установки у вигляді леткої золи (виносу) та або донної золи (шлаку). Частка золи, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, $a_{\text{вин}}$ залежить від технології спалювання палива і визначається за даними останніх випробувань енергетичної установки, а за їх відсутності – за паспортними даними. За відсутності таких даних значення $a_{\text{вин}}$ приймаються згідно з таблицею 2.1.

Таблиця 2.1 — Частка леткої золи $a_{\text{вин}}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	—
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	—
З нерухомим шаром	0,15	—

Значення ефективності очищення димових газів від твердих частинок $\eta_{\text{зу}}$ визначається за результатами останніх випробувань золоуловлювальної установки або за її паспортними даними. Ефективність золоуловлювальної установки визначається як різниця між одиницею та відношенням масових концентрацій твердих частинок після і до золоуловлювальної установки.

При використанні сорбенту для зв'язування оксидів сірки в топці котла (наприклад, за технологіями спалювання палива в киплячому шарі) чи при застосуванні технологій сухого або напівсухого зв'язування сірки утворюються тверді частинки сульфату та сульфіту і невикористаного сорбенту. Показник емісії твердих частинок невикористаного в енергетичній установці сорбенту та утворених сульфатів і сульфідів $k_{\text{твS}}$, г/ГДж, розраховується за формулою

$$k_{\text{твS}} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{S^r}{100} \left[\eta_I \frac{\mu_{\text{прод}}}{\mu_S} + (m - \eta_I) \frac{\mu_{\text{сорб}}}{\mu_S} \right] a_{\text{вин}} (1 - \eta_{\text{зу}}), \quad (2.4)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

$\mu_{\text{прод}}$ – молекулярна маса твердого продукту взаємодії сорбенту та оксидів сірки, кг/кмоль;

$\mu_{\text{сорб}}$ – молекулярна маса сорбенту, кг/кмоль;

μ_S – молекулярна маса сірки, яка дорівнює 32 кг/кмоль;

m – мольне відношення активного хімічного елементу сорбенту та сірки (таблиця 2.2);

η_I – ефективність зв'язування сірки сорбентом у топці або при застосуванні сухих та напівсухих методів десульфуризації димових газів (таблиці 2.2 і 2.3);

$\eta_{\text{зу}}$ – ефективність очистки димових газів від твердих частинок.

Таблиця 2.2 — Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у топці

Технологія спалювання	η_I	Примітка
Факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням	0,05	Зв'язування золою палива
Факельне спалювання вугілля в котлах з твердим шлаковидаленням	0,10	Зв'язування золою палива
Факельне спалювання мазуту в котлах	0,02	Зв'язування золою палива

Спалювання в киплячому шарі	0,95	Зв'язування сорбентом у котлі при мольному відношенні $\text{Ca/S } m = 2,5$
-----------------------------	------	--

Таблиця 2.3 — Ефективність та коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Технологія десульфуризації димових газів	Параметри сіркоочисної установки	
	$\eta_{\text{ш}}$	β
Мокре очищення – у скрубєрі з використанням вапняку (вапна) або доломіту з одержанням гіпсу	0,95	0,99
Мокре очищення – процес Веллмана—Лорда з використанням солей натрію	0,97	0,99
Мокре очищення – процес Вальтера з використанням аміачної води	0,88	0,99
Напівсухе очищення – розпилення крапель суспензії або розчину сорбенту в реакторі (технології ESOX, GSA, Niro Atomizer...)	0,90	0,99
Сухе очищення – інжекція сухого сорбенту (DSI)	0,45	0,98
Напівсухе очищення – процес LIFAC як розвиток процесу DSI з розпилом крапель води	0,80	0,98
Напівсухе очищення – процес Lurgi CFB (з використанням реактора циркулюючого киплячого шару) з розпилом крапель води	0,90	0,99
Сухе очищення – абсорбція активованим вугіллям	0,95	0,99
Каталітичне очищення від оксидів сірки і азоту (DESONOX, SNOX)	0,95	0,99

Задача 3

Розглядається енергоблок з котлом, призначеним для факельного спалювання вугілля з високим вмістом летких, типу газового або

довгополуменового, з рідким шлаковидаленням. Номінальна паропроодуктивність котла енергоблока становить 950 т/год, а середня фактична паропроодуктивність – 760 т/год. На ньому застосовується ступенева подача повітря та рециркуляція димових газів. Пароперегрівачі котла очищуються при зупинці блока. Для уловлювання твердих частинок використовується електростатичний фільтр типу ЕГА з ефективністю золовловлення 0,985. Установки для очищення димових газів від оксидів азоту та сірки відсутні. За звітний період використовувалось таке паливо:

- донецьке газове вугілля марки ГР — 1 096 363 т;
- високосірчистий мазут марки 40 — 70 945 т;
- природний газ із газопроводу Уренгой-Ужгород — 84 762 тис. м³.

За даними елементного та технічного аналізу склад робочої маси вугілля такий, %:

вуглець (C ^r)	—	52,49;
водень (H ^r)	—	3,50;
кисень (O ^r)	—	4,99;
азот (N ^r)	—	0,97;
сірка (S ^r)	—	2,85;
зола (A ^r)	—	25,20;
волога (W ^r)	—	10,00;
леткі речовини (V ^r)	—	25,92.

Нижча теплота згоряння робочої маси вугілля становить 20,47 МДж/кг. Технічний аналіз уловленої золи та шлаку показав, що масовий вміст горючих речовин у леткій золі $\Gamma_{\text{вин}}$ дорівнює 1,5 %, а в шлаці $\Gamma_{\text{шл}}$ – 0,5 %.

За даними таблиці А.3 (додаток А) склад горючої маси мазуту такий, %:

вуглець	—	85,50;
водень	—	11,20;
кисень та азот	—	0,80;
сірка	—	2,50.

Нижча теплота згоряння горючої маси мазуту дорівнює 40,40 МДж/кг, вологість робочої маси палива — 2,00 %, зольність сухої маси — 0,15 %, вміст ванадію (V) — 333,3 мг/кг (= 2222 · 0,15).

За даними таблиці А.3 (додаток А) об'ємний склад сухої маси природного газу становить, %:

метан (CH ₄)	—	98,90;
етан (C ₂ H ₆)	—	0,12;
пропан (C ₃ H ₈)	—	0,011;
бутан (C ₄ H ₁₀)	—	0,01;
вуглекислий газ (CO ₂)	—	0,06;

азот (N₂) — 0,90.

Об'ємна нижча теплота згоряння газу дорівнює 33,08 МДж/м³, густина – 0,723 кг/м³ при нормальних умовах.

Розв'язання

Валовий викид твердих частинок при спалюванні вугілля:

Показник емісії твердих частинок визначається як специфічний і розраховується за формулою (2.2):

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{\text{ВИН}} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{\text{ВИН}}} (1 - \eta_{\text{ЗУ}}) + k_{\text{ТВС}}.$$

Сірководиста установка відсутня, тому викиду твердих частинок сорбенту та продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки немає. Ефективність золоуловлювальної установки $\eta_{\text{ЗУ}}$ за даними останніх випробувань становить 0,985. Показник емісії твердих частинок:

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{20,47} \cdot 0,8 \cdot \frac{25,20}{100 - 1,5} (1 - 0,985) = 150 \text{ г/ГДж}.$$

За формулою (2.1) валовий викид

$$E_{\text{ТВ}} = 10^{-6} k_{\text{ТВ}} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 150 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 3366 \text{ т}.$$

Валовий викид твердих частинок при спалюванні мазуту

Показник емісії твердих частинок визначається як специфічний і розраховується за формулою (2.2):

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{Q_i^r} a_{\text{ВИН}} \frac{A^r}{100 - \Gamma_{\text{ВИН}}} (1 - \eta_{\text{ЗУ}}) + k_{\text{ТВС}} \text{ г/ГДж}.$$

Сірководиста установка відсутня, тому викиду твердих частинок сорбенту та продуктів взаємодії сорбенту та оксидів сірки немає. Масовий вміст горючих речовин у викиді твердих частинок $\Gamma_{\text{ВИН}}$ становить 0 %. Ефективність золоуловлювальної установки $\eta_{\text{ЗУ}}$, за даними останніх випробувань, становить 0,985. Показник емісії твердих частинок

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{10^6}{39,48} \cdot 1 \cdot \frac{0,15}{100 - 0} (1 - 0,985) = 0,57 \text{ г/ГДж}.$$

Тоді за формулою (2.1) валовий викид:

$$E_{\text{ТВ}} = 10^{-6} k_{\text{ТВ}} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 0,57 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 1,60 \text{ т}.$$

При спалюванні природного газу тверді частинки відсутні.

Практичне заняття № 3. Розрахунок валових викидів діоксиду сірки SO_2

Валовий викид діоксиду сірки, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається за наступною формулою:

$$E_{\text{so}_2} = 10^{-6} \cdot k_{\text{so}_2} B_i (Q_i^r)_i, \quad (3.1)$$

де E_{so_2} , – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{so_2} , – показник емісії j -ї забруднювальної речовини для i -го палива, г/ГДж;

B_i – витрата i -го палива за проміжок часу P , т;

$(Q_i^r)_i$ – нижча робоча теплота згоряння i -го палива, МДж/кг.

Показник емісії k_{so_2} , г/ГДж, оксидів сірки SO_2 та SO_3 , у перерахунку на діоксид сірки SO_2 , які надходять у атмосферу з димовими газами, є специфічним і розраховується за формулою

$$k_{\text{so}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (3.2)$$

де Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу за проміжок часу P , %;

η_I – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці;

η_{II} – ефективність очистки димових газів від оксидів сірки;

β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Масовий вміст сірки в робочій масі потрібно визначати під час технічного аналізу палива відповідно до ГОСТ 27313—95 (ISO 1170—77).

Усереднені значення вмісту сірки для різних видів і марок палива наведено в додатку А. Ці значення беруться у випадку відсутності достовірних даних технічного аналізу.

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у енергетичній установці η_I залежить від технології спалювання та хімічного складу палива, яке спалюється, і типу сорбенту. Під час спалювання твердого палива, до мінеральної складової якого входять сполуки лужних та лужноземельних металів, відбувається часткове зв'язування сірки з утворенням сульфатів або сульфідів. Під час спалювання твердого палива за технологіями кипячого шару подача сорбенту разом з паливом забезпечує ефективне зв'язування сірки в топці енергетичної установки. За відсутності даних для енергетичної установки про ефективність зв'язування сірки в топковому просторі значення η_I для різних технологій спалювання палива приймаються згідно з таблицею 3.1.

Таблиця 3.1 — Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у топці

Технологія спалювання	η_I
Факельне спалювання вугілля в котлах з рідким шлаковидаленням	0,05
Факельне спалювання вугілля в котлах з твердим шлаковидаленням	0,10
Факельне спалювання мазуту в котлах	0,02
Спалювання в кипячому шарі	0,95

Димові гази можуть бути очищені від оксидів сірки в сіркоочисних установках шляхом застосування технологій десульфуризації димових газів з різною ефективністю очищення η_{II} . Коефіцієнт роботи сіркоочисної установки β визначається як відношення часу роботи сіркоочисної установки до часу роботи енергетичної установки. Для розрахунків необхідно використовувати значення η_{II} , одержане під час останнього випробування сіркоочисної установки, і значення β , одержане при аналізі даних про роботу очисної та енергетичної установок у цілому. За відсутності таких даних значення ефективності сіркоочищення димових газів та коефіцієнта роботи сіркоочисної установки за різними технологіями десульфуризації приймаються згідно з таблицею 3.2.

Таблиця 3.2 — Ефективність та коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Технологія десульфуризації димових газів	Параметри сіркоочисної установки	
	η_{II}	β
Мокре очищення – у скрубєрі з використанням вапняку (вапна) або доломіту з одержанням гіпсу	0,95	0,99
Мокре очищення – процес Веллмана—Лорда з використанням солей натрію	0,97	0,99
Мокре очищення – процес Вальтера з використанням аміачної води	0,88	0,99
Напівсухе очищення – розпилення крапель суспензії або розчину сорбенту в реакторі (технології ESOX, GSA, Niro Atomizer...)	0,90	0,99
Сухе очищення – інжекція сухого сорбенту (DSI)	0,45	0,98
Напівсухе очищення – процес LIFAC як розвиток процесу DSI з розпилом крапель води	0,80	0,98
Напівсухе очищення – процес Lurgi CFB (з використанням реактора циркулюючого киплячого шару) з розпилом крапель води	0,90	0,99
Сухе очищення – абсорбція активованим вугіллям	0,95	0,99
Каталітичне очищення від оксидів сірки і азоту (DESONOX, SNOX)	0,95	0,99

До установок десульфуризації димових газів відносяться і деякі види золоуловлювальних установок. Для електростатичних фільтрів та циклонів ефективність уловлення оксидів сірки η_{II} є незначною і дорівнює нулю. Для мокрих золоуловлювальних установок (мокрих скрубєрів типу МС та МВ) величина η_{II}

залежить від загальної лужності води на зрошення та від вмісту сірки в паливі S' . Приведений вміст сірки визначається як відношення масового вмісту сірки на робочу масу палива до нижчої робочої теплоти згоряння палива ($S' = S''/Q_i''$). Дані про ефективність уловлення оксидів сірки в мокрих скруберах наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Ефективність уловлювання оксидів сірки $\eta_{\text{п}}$ під час золоочищення за допомогою мокрого скрубера

Приведений вміст сірки, %/(МДж/кг)	Лужність води на зрошення, мг-екв/дм ³		
	0	5	10
0,01	0,0250	0,1450	0,3000
0,02	0,0220	0,0850	0,1680
0,03	0,0195	0,0520	0,1010
0,04	0,0180	0,0390	0,0660
0,05	0,0175	0,0300	0,0520
0,06	0,0170	0,0260	0,0430
0,07	0,0165	0,0215	0,0350
0,08	0,0160	0,0200	0,0300
0,09	0,0155	0,0190	0,0275
0,10	0,0150	0,0180	0,0230
0,11	0,0145	0,0170	0,0205
0,12	0,0135	0,0160	0,0200
0,13	0,0130	0,0150	0,0185
0,18	0,0120	0,0120	0,0120

ЗАДАЧА 4

Розрахувати валові викиди сірчистого ангідриду при спалюванні вугілля та мазуту для умови Задачі 3

Розв'язання

Валовий викид сірчистого ангідриду при спалюванні вугілля

Показник емісії оксидів сірки (у перерахунку на діоксид сірки SO_2), які надходять у атмосферу з димовими газами за проміжок часу P , є специфічним і розраховується за формулою (3.2):

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \text{ г/ГДж.}$$

Ефективність зв'язування оксидів сірки золою або сорбентом у енергетичній установці η_I (таблиця 3.1) становить 0,05. Сіркоочисна установка відсутня, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. (Якщо сіркоочисна установка присутня, ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β визначають з табл. 3.2.) Показник емісії k_{SO_2} оксиду сірки

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{20,47} \cdot \frac{2 \cdot 2,85}{100} (1 - 0,05) = 2646 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді за формулою (3.1) валовий викид

$$E_{\text{SO}_2} = 10^{-6} k_{\text{SO}_2} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 2646 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 59393 \text{ т.}$$

Викид сірчистого ангідриду при спалюванні мазуту

Показник емісії оксидів сірки розраховується за формулою (3.2):

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{Q_i^r} \cdot \frac{2S^r}{100} (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta) \text{ г/ГДж.}$$

Ефективність зв'язування оксидів сірки η_I за даними таблиці 3.1 становить 0,05, а ефективність уловлювання оксидів сірки разом з твердими частинками в золоуловлювальній установці дорівнює нулю. Сіркоочисна установка відсутня, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії E_{SO_2} оксиду сірки

$$k_{\text{SO}_2} = \frac{10^6}{39,48} \cdot \frac{2 \cdot 2,45}{100} (1 - 0,05) = 1176 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді за формулою (3.1) валовий викид

$$E_{\text{SO}_2} = 10^{-6} k_{\text{SO}_2} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 1176 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 3297 \text{ т.}$$

Практичне заняття № 4. Розрахунок валових викидів оксидів азоту NO_x

Під час спалювання органічного палива утворюються оксиди азоту NO_x (оксид азоту NO та діоксид азоту NO_2), викиди яких визначаються в перерахунку на NO_2 .

Валовий викид оксидів азоту, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається за наступною формулою:

$$E_{\text{NO}_x} = 10^{-6} k_{\text{NO}_x} Q_i^r B, \quad (4.1)$$

де E_{NO_x} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{NO_x} – показник емісії забруднювальної речовини для використовуваного палива, г/ГДж;

B – витрата палива за проміжок часу P , т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} , г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду розраховується як

$$k_{\text{NO}_x} = (k_{\text{NO}_x})_0 f_n (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \quad (4.2)$$

де $(k_{\text{NO}_x})_0$ – показник емісії оксидів азоту без урахування заходів скорочення викиду, г/ГДж;

f_n – ступінь зменшення викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні;

η_I – ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викиду;

η_{II} – ефективність вторинних заходів (азотоочисної установки);

β – коефіцієнт роботи азотоочисної установки.

Значення узагальненого показника емісії оксидів азоту під час спалювання органічного палива за різними технологіями без урахування заходів щодо скорочення викиду NO_x визначаються згідно з таблицею 4.1.

Таблиця 4.1 — Показник емісії оксидів азоту без урахування первинних заходів, г/ГДж

Технологія спалювання	Тверде паливо	Мазу т	Газотурбін не паливо	Природний газ
<i>Факельне спалювання:</i>				
Теплова потужність котла ≥ 300 МВт:	—	200	—	150
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	420	—	—	—
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	250	—	—	—
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	230	—	—	—
Теплова потужність котла < 300 МВт:	140		—	100
з рідким шлаковидаленням при спалюванні антрациту	250	—	—	—
з рідким шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	180	—	—	—
з твердим шлаковидаленням при спалюванні кам'яного вугілля	160	—	—	—
з горизонтальною циклонною топкою для кам'яного вугілля	480	—	—	—
<i>Циркулюючий киплячий шар</i>	70	—	—	—
<i>Киплячий шар під тиском</i>	100	—	—	—
<i>Нерухомий шар</i>	100	—	—	—
<i>Камера згоряння газової турбіни</i>	—	150	150	120

Під час роботи енергетичної установки на низькому навантаженні зменшується температура процесу горіння палива, завдяки чому скорочується викид оксидів азоту. Ступінь зменшення викиду NO_x при цьому визначається за емпіричною формулою

$$f_n = (Q_\phi / Q_n)^z, \quad (4.3)$$

де f_n – ступінь зменшення викиду оксидів азоту під час роботи на низькому навантаженні;

$Q_{\text{ф}}$ – фактична теплова потужність енергетичної установки, МВт;

$Q_{\text{н}}$ – номінальна теплова потужність енергетичної установки, МВт;

z – емпіричний коефіцієнт, який залежить від виду енергетичної установки, її потужності, типу палива тощо.

Для парових котлів теплова потужність Q залежить від паропродуктивності D_0 , параметрів пари та інших характеристик котла.

Формула розрахунку теплової потужності парового котла Q , МВт, на основі даних про його паропродуктивність має вигляд

$$Q = D_0 \frac{1}{w}, \quad (4.4)$$

де D_0 – паропродуктивність парового котла, т/год;

w – відношення паропродуктивності до теплової потужності котла, т/(год·МВт).

Значення відношення паропродуктивності котла D_0 до його теплової потужності Q наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 — Значення відношення паропродуктивності котла до його теплової потужності

Обладнання	Значення
Котел з тиском свіжої пари p_0 (13,8 МПа (при $D_0 \leq 500$ т/год) з проміжним перегрівом	1,35
Котел з тиском пари в межах: $9,8 \text{ МПа} \leq p_0 \leq 13,8 \text{ МПа}$ (при $D_0 < 500$ т/год) без проміжного перегріву	1,45
Котел з тиском пари в межах: $1,4 \text{ МПа} < p_0 < 9,8 \text{ МПа}$ (при $D_0 = 6,5 \dots 75$ т/год для перегрітої пари) без проміжного перегріву	1,35
Котел з тиском пари $p_0 \leq 1,4 \text{ МПа}$ (при $D_0 \leq 20$ т/год для насиченої пари) без проміжного перегріву	1,50

Для водогрійних котлів формула переведення теплової потужності з Гкал/год в МВт(т) має вигляд

$$Q = N \frac{4,1867}{3,6} = 1,163N, \quad (4.5)$$

де Q – теплова потужність водогрійного котла, МВт;

N – теплова потужність водогрійного котла, Гкал/год.

Емпіричний коефіцієнт z визначається під час випробувань енергетичної установки. За їх відсутності значення z береться з таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 — Значення емпіричного коефіцієнта z

Теплова потужність (паропродуктивність) котельної установки	Тверде паливо	Природний газ, мазут
Паровий котел 140 МВт і вище (200 т/год і вище)	1,15	1,25
Паровий котел від 22 до 140 МВт (від 30 до 200 т/год)	1,15	1,25
Водогрійний котел	1,15	1,25

Первинні (режимно-технологічні) заходи спрямовано на зменшення утворення оксидів азоту в топці або камері згоряння енергетичної установки. До цих заходів відносяться: використання малотоксичних пальників, ступенева подача повітря та палива, рециркуляція димових газів тощо. Значення ефективності застосування первинних заходів η_1 , окремих та їх комбінацій, визначаються за результатами випробувань енергетичної установки після їх впровадження і затверджуються відповідними актами. Орієнтовні значення ефективності первинних заходів зменшення викиду оксидів азоту наведено в таблиці 4.4.

За неможливості досягти за допомогою первинних заходів допустимої концентрації оксидів азоту в димових газах для їх очищення від NO_x використовують азотоочисну установку. Значення ефективності η_{II} та коефіцієнта роботи азотоочисної установки (відношення часу роботи азотоочисної установки до часу роботи енергетичної установки) визначаються під час випробувань, а за їх відсутності — згідно з таблицею 4.6.

Таблиця 4.5 — Ефективність первинних заходів η_I скорочення викиду NO_x .

Тип первинних заходів	Ефективність η_I
Малотоксичні пальники	0,20
Ступенева подача повітря	0,30
Подача третинного повітря	0,20
Рециркуляція димових газів	0,10
Трьохступенева подача повітря та палива	0,35
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря	0,45
Малотоксичні пальники + подача третинного повітря	0,40
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	0,30
Ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,45
Ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,40
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,50
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,60

Таблиця 4.6 — Ефективність та коефіцієнт роботи азотоочисної установки NO_x

Технологія очищення димових газів від NO_x	Ефективність η_{II}	Коефіцієнт роботи β
Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ)	0,50	0,99
Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	0,80	0,99
Активоване вугілля	0,70	0,99
DESONOX – SNOX	0,95	0,99

Примітка. Технологія DESONOX і її різновид SNOX базуються на каталітичному очищенні димових газів одночасно від оксидів сірки та азоту.

ЗАДАЧА 5

Розрахувати валові викиди оксидів азоту при спалюванні вугілля, мазуту та природного газу для умови Задачі 3

Розв'язання

Валовий викид оксидів азоту при спалюванні вугілля

Узагальнений показник емісії оксидів азоту k_{NO_x} розраховується за формулою (4.2):

$$k_{\text{NO}_x} = (k_{\text{NO}_x})_0 f_n (1 - \eta_I)(1 - \eta_{II}\beta), \text{ г/ГДж.}$$

Показник емісії оксидів азоту кам'яного вугілля без урахування заходів зі зменшення викидів $(k_{\text{NO}_x})_0$ становить 250 г/ГДж (таблиця 4.1). Як видно з таблиці 4.3, відповідний емпіричний коефіцієнт для розрахунку ступеня зниження викиду NO_x під час роботи на низькому навантаженні $z = 1,15$. Відповідно до початкових даних та згідно з таблицею 4.5 ефективність первинних заходів зі зменшення викиду оксидів азоту η_I становить 0,40. Азотоочисної установки на енергетичній установці немає, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії k_{NO_x} оксидів азоту

$$k_{\text{NO}_x} = 250 \cdot (563/704)^{1,15} \cdot (1 - 0,40) = 116 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді за формулою (4.1) валовий викид

$$E_{\text{NO}_x} = 10^{-6} k_{\text{NO}_x} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 116 \cdot 20,47 \cdot 1\,096\,363 = 2604 \text{ т.}$$

Валовий викид оксидів азоту при спалюванні мазуту

Показник емісії оксидів азоту $(k_{\text{NO}_x})_0$ без урахування первинних заходів згідно з даними таблиці 4.1 дорівнює 200 г/ГДж.

Відповідно до початкових даних і згідно з таблицею 4.5 ефективність первинних заходів зменшення викиду оксидів азоту η_I становить 0,40. Емпіричний коефіцієнт z дорівнює 1,25 (таблиця 4.3). Азотоочисна установка відсутня, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії k_{NO_x} оксидів азоту

$$k_{\text{NO}_x} = 200(563/704)^{1,25} (1 - 0,40)(1 - 0) = 90,8 \text{ г/ГДж.}$$

Валовий викид оксидів азоту E_{NO_x} за звітний період дорівнює

$$E_{\text{NO}_x} = 10^{-6} k_{\text{NO}_x} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 90,8 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 254 \text{ т.}$$

Валовий викид оксидів азоту при спалюванні природного газу

Показник емісії оксидів азоту $(k_{\text{NOx}})_0$ без урахування первинних заходів згідно з даними таблиці 4.1 дорівнює 150 г/ГДж. У таблиці 4.3 емпіричний коефіцієнт z для природного газу становить 1,25. Відповідно до вихідних даних та згідно з таблицею 4.5 ефективність первинних заходів зменшення викиду оксидів азоту η_I становить 0,40. Азотоочисна установка відсутня, тому ефективність η_{II} та коефіцієнт роботи β дорівнюють нулю. Показник емісії k_{NOx} оксидів азоту

$$k_{\text{NOx}} = 150 \cdot (563/704)^{1,25} (1 - 0,40) = 68,1 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді за формулою (4.1) валовий викид

$$E_{\text{NOx}} = 10^{-6} k_{\text{NOx}} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 68,1 \cdot 45,75 \cdot 61252 = 191 \text{ т.}$$

Практичне заняття № 5. Розрахунок валових викидів оксидів вуглецю CO_x

5.1. Розрахунок валового викиду оксиду вуглецю CO

Утворення оксиду вуглецю CO є результатом неповного згоряння вуглецю органічного палива. Зі зменшенням потужності енергетичної установки концентрація CO в димових газах зростає. Основним методом визначення викидів оксиду вуглецю є вимірювання його концентрації.

За відсутності постійних вимірювань концентрації CO валовий викид оксиду вуглецю визначається за формулою (5.1.1).

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} k_{\text{CO}} Q_i^r B, \text{ т} \quad (5.1.1)$$

де E_{CO} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{CO} – показник емісії забруднювальної речовини для використовуваного палива, г/ГДж;

B – витрата палива за проміжок часу P , т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Для конкретної енергетичної установки специфічний показник емісії оксиду вуглецю може бути визначено на основі результатів випробувань енергетичної установки, документально підтверджених відповідними актами.

Значення узагальненого показника емісії оксиду вуглецю залежно від виду палива, потужності енергетичної установки та технології спалювання визначаються з таблиці 5.1.1.

Таблиця 5.1.1 — Показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} , г/ГДж

Показник	Тверде паливо	Мазут	Природний газ
Факельне спалювання:	—	15	17
Котел з рідким шлаковидаленням	11,4	—	—
Котел з твердим шлаковидаленням	11,4	—	—

Спалювання в киплячому шарі	9,7	—	—
Спалювання в нерухомому шарі	121	—	—
Спалювання в камері згоряння ГТУ	—	15	15

5.2 Діоксид вуглецю CO₂

Діоксид вуглецю (вуглекислий газ CO₂) відноситься до парникових газів і є основним газоподібним продуктом окислення вуглецю органічного палива. Обсяг викиду CO₂ безпосередньо пов'язано із вмістом вуглецю в паливі та ступенем окислення вуглецю палива в енергетичній установці.

Валовий викид діоксиду вуглецю, що надходить у атмосферу з димовими газами енергетичної установки за проміжок часу P , визначається за наступною формулою:

$$E_{\text{CO}_2} = 10^{-6} k_{\text{CO}_2} Q_i^r B, \quad (5.2.1)$$

де E_{CO_2} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{CO_2} – показник емісії забруднювальної речовини для використовуваного палива, г/ГДж;

B – витрата палива за проміжок часу P , т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Показник емісії діоксиду вуглецю k_{CO_2} , г/ГДж, під час спалювання органічного палива визначається за формулою

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_c = 3,67 k_c \varepsilon_c, \quad (5.2.2)$$

де C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

ε_c – ступінь окислення вуглецю палива (1.4);

k_c – показник емісії вуглецю палива, г/ГДж.

Ступінь окислення вуглецю палива ε_c в енергетичній установці розраховується за формулою

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{\text{вин}} \frac{\Gamma_{\text{вин}}}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} + (1 - a_{\text{вин}}) \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} \right), \quad (5.2.3)$$

де A^r — масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

C^r — масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$a_{\text{вин}}$ — частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи;

$\Gamma_{\text{вин}}$ — масовий вміст горючих речовин у виносі твердих частинок, %;

$\Gamma_{\text{шл}}$ — масовий вміст горючих речовин у шлаку, %.

Таблиця 5.2.1 — Частка леткої золи $a_{\text{вин}}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	—
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	—
З нерухомим шаром	0,15	—

Для природного газу рекомендоване значення ε_c становить 0,995, для мазуту — 0,99¹⁾. Вміст золи A^r в паливі та горючих речовин у шлаку $\Gamma_{\text{шл}}$ і викидах твердих частинок $\Gamma_{\text{вин}}$ визначається технічним аналізом палива (ГОСТ 27313—95), а також шлаку та твердих частинок, які виходять з енергетичної установи. Частка золи $a_{\text{вин}}$, яка виноситься з енергетичної установи у вигляді леткої золи, залежить

від технології спалювання палива. Вона визначається для енергетичної установки за паспортними даними та при проведенні її випробувань.

Специфічний показник емісії вуглецю k_C , г/ГДж, — це відношення вмісту вуглецю палива до його теплоти згоряння:

$$k_C = \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r}, \quad (5.2.4)$$

де C^r — масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

Q_i^r — нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

За відсутності даних про вміст вуглецю в паливі та його теплоту згоряння необхідно користуватись узагальненим показником емісії вуглецю, наведеним у таблиці 5.2.2.

Таблиця 5.2.2 — Показник емісії вуглецю палива k_C , г/ГДж¹⁾

Паливо	Значення
Вугілля:	
Антрацит	28 160
Пісне	26 050
газове та довгополумєневе	25 180
Буре	25 630
Мазут	21 100
Природний газ	15 300

¹⁾ Викиди парникових газів. Підприємства Міненерго України. 1990 та 1999 роки. Ініціатива з питань зміни клімату, 2000 – 62 стор.

Під час спалювання органічного палива в енергетичній установці може утворюватись монооксид вуглецю, але в атмосфері він неодмінно перетвориться в діоксид вуглецю. Тому під час розрахунку показника емісії CO₂ вважають, що весь вуглець палива, який згорів, перетворюється у вуглекислий газ.

Задача 6

Розрахувати валові викиди оксидів вуглецю при спалюванні вугілля, мазуту та природного газу для умови Задачі 3

Розв'язання

Валові викиди оксидів вуглецю при спалюванні вугілля

За даними таблиці 5.1.1 показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} становить 11,4 г/ГДж. Тоді за формулою (5.1.1) валовий викид оксиду вуглецю E_{CO}

$$E_{CO} = 10^{-6} k_{CO} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 11,4 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 256 \text{ Т.}$$

Показник емісії вуглекислого газу при спалюванні органічного палива визначається за формулою (5.2.2)

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_C, \text{ г/ГДж.}$$

У цьому прикладі при рідкому шлаковидаленні частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи $a_{\text{вин}}$ становить 0,8 (таблиця 5.2.1). У котлі відбувається неповне згоряння палива, у першу чергу через механічний недопал. Ступінь окислення вуглецю для робочої маси палива ε_C в енергетичній установці розраховується за формулою (5.2.3):

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{\text{вин}} \frac{\Gamma_{\text{вин}}}{100 - \Gamma_{\text{вин}}} + (1 - a_{\text{вин}}) \frac{\Gamma_{\text{шл}}}{100 - \Gamma_{\text{шл}}} \right),$$
$$\varepsilon_C = 1 - \frac{25,20}{52,49} \left(0,80 \frac{1,50}{100 - 1,50} + (1 - 0,80) \frac{0,50}{100 - 0,50} \right) = 0,994.$$

Показник емісії вуглекислого газу

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{52,49}{100} \cdot \frac{10^6}{20,47} \cdot 0,994 = 93409 \text{ г/ГДж}$$

Тоді за формулою (5.2.1) валовий викид

$$E_{CO_2} = 10^{-6} k_{CO_2} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 93409 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 2096657 \text{ Т.}$$

Валові викиди оксидів вуглецю при спалюванні мазуту

За даними таблиці 5.1.1 показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} становить 15 г/ГДж. Тоді за формулою (5.1.1) валовий викид E_{CO} оксиду вуглецю

$$E_{CO} = 10^{-6} k_{CO} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 15 \cdot 39,54 \cdot 70945 = 42,1 \text{ Т.}$$

Показник емісії вуглекислого газу під час спалювання органічного палива визначається за формулою (5.2.2):

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_C, \text{ г/ГДж.}$$

Ступінь окислення вуглецю ε_C під час спалювання мазуту в енергетичній установці становить 0,99. Показник емісії вуглекислого газу

$$k_{CO_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{83,66}{100} \cdot \frac{10^6}{39,48} \cdot 0,99 = 76918 \text{ г/ГДж.}$$

За формулою (5.2.1) валовий викид

$$E_{\text{CO}_2} = 10^{-6} k_{\text{CO}_2} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 76918 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 215455 \text{ Т.}$$

Валові викиди оксидів вуглецю під час спалювання природного газу

За даними таблиці 5.1.1 показник емісії оксиду вуглецю k_{CO} становить 17 г/ГДж. Валовий викид оксиду вуглецю E_{CO}

$$E_{\text{CO}} = 10^{-6} k_{\text{CO}} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 17 \cdot 45,75 \cdot 61252 = 48 \text{ Т.}$$

Показник емісії вуглекислого газу під час спалювання органічного палива визначається:

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{C^r}{100} \cdot \frac{10^6}{Q_i^r} \varepsilon_c \text{ г/ГДж.}$$

Ступінь окислення вуглецю ε_c під час спалювання природного газу в енергетичній установці становить 0,995. Показник емісії вуглекислого газу

$$k_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \cdot \frac{73,67}{100} \cdot \frac{10^6}{45,78} \cdot 0,995 = 58716 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді валовий викид

$$E_{\text{CO}_2} = 10^{-6} k_{\text{CO}_2} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 58716 \cdot 45,78 \cdot 61252 = 164635 \text{ Т.}$$

Практичне заняття № 6. Розрахунок валових викидів важких металів

Викид важких металів та їх сполук пов'язано з наявністю в мінеральній частині палива сполук важких металів. До важких металів, сполуки яких найбільш шкідливі для навколишнього середовища, відносяться: арсен (As), кадмій (Cd), хром (Cr), мідь (Cu), ртуть (Hg), нікель (Ni), свинець (Pb), селен (Se), цинк (Zn). Під час спалювання мазуту або важкого дизельного палива до важких металів цієї групи віднесено також ванадій (V) та його сполуки. У частинках леткої золи більшість цих елементів зустрічається у вигляді оксидів і хлоридів. У газоподібних викидах можлива наявність ртуті, селену та арсену, які частково випаровуються з палива.

6.1 Спалювання вугілля

Під час спалювання вугілля показник емісії важкого металу $k_{в.м}$, г/ГДж, є специфічним і визначається за формулою

$$k_{в.м} = \frac{c_{в.м}}{Q_i^r} [a_{вин} f_{зб} (1 - \eta_{зу}) (1 - f_{г}) + f_{г} (1 - \eta_{гзу})], \quad (6.1.1)$$

де $c_{в.м}$ – масовий вміст важкого металу у паливі, мг/кг;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

$a_{вин}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

$f_{зб}$ – коефіцієнт збагачення важкого металу;

$\eta_{зу}$ – ефективність золоуловлювальної установки;

$f_{г}$ – частка важкого металу, яка виходить у газоподібній формі;

$\eta_{гзу}$ – ефективність уловлення газоподібної фракції важкого металу в золоуловлювальній установці.

Частка золи $a_{вин}$, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, залежить від технології спалювання палива (таблиця 6.1.1)., Масовий вміст важкого металу в паливі визначається під час проведення елементного аналізу палива, що спалюється в енергетичній установці.

За відсутності можливості вимірювання вмісту важких металів у паливі орієнтовні значення $c_{\text{вм}}$ визначають згідно з таблицею 6.1.2.

Таблиця 6.1.1 — Частка леткої золи $a_{\text{вин}}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	—
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	—
З нерухомим шаром	0,15	—

Таблиця 6.1.2 — Вміст важких металів $c_{\text{вм}}$ у енергетичному вугіллі, мг/кг

Вугілля	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Антрацитовий штиб АШ	20	0	47	29	0.28	26	20	0	40
Донецьке пісне ТР	20	0	47	29	0.20	26	18	0	40
Донецьке ГР	20	0	47	29	0.14	26	14	0	40
Донецьке довгополуменеве ДР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Львівсько-Волинське (ЛВ) ГР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Олександрійське буре Б1Р	20	0	47	29	0.16	26	14	0	40

Коефіцієнт збагачення $f_{\text{зб}}$ характеризує властивість “збагачення” (підвищення вмісту) важкого металу в частинках золи. Вміст важких металів у

різних фракціях золи різний: у дрібній фракції золи вміст їх вищий, ніж у крупній. Оскільки в золоуловлювальній установці найбільш ефективно уловлюється крупна фракція, то в атмосферне повітря викидається дрібна фракція, в якій вміст важких металів більший. Діапазон значень та рекомендовані величини f_{36} наведено в таблиці 6.1.3. Ці значення застосовуються у випадку відсутності даних для конкретних видів і марок твердого палива, яке спалюється в енергетичній установці.

Таблиця 6.1.3 — Коефіцієнт збагачення важких металів після золоуловлювача

	Ступінь уловлення			
	$\eta \leq 0,7$	$0,7 < \eta \leq 0,97$	$0,97 < \eta \leq 0,99$	$\eta > 0,99$
Арсен (As)	1,0	$= 3,70 \cdot \eta - 1,59$	$= 175 \cdot \eta - 167,75$	5,5
Кадмій (Cd)	1,0	$= 7,04 \cdot \eta - 3,93$	$= 205 \cdot \eta - 195,55$	7,0
Хром (Cr)	1,0	1,0	1,0	1,0
Мідь (Cu)	1,0	$= 0,37 \cdot \eta + 0,74$	$= 60 \cdot \eta - 57,10$	2,3
Ртуть (Hg)	1,0	1,0	1,0	1,0
Нікель (Ni)	1,0	$= 1,48 \cdot \eta - 0,04$	$= 95 \cdot \eta - 90,75$	3,3
Свинець (Pb)	1,0	$= 5,56 \cdot \eta - 2,89$	$= 175 \cdot \eta - 167,25$	6,0
Селен (Se)	1,0	$= 7,78 \cdot \eta - 4,44$	$= 220 \cdot \eta - 210,30$	7,5
Цинк (Zn)	1,0	$= 7,04 \cdot \eta - 3,93$	$= 205 \cdot \eta - 195,55$	7,0

Частка важкого металу, яка виходить з вугілля у газоподібному вигляді, f_g залежить від фізико-хімічних властивостей важкого металу. Орієнтовні значення цієї частки наведено в таблиці 6.1.4.

Таблиця 6.1.4 — Частка газоподібної фракції важкого металу при спалюванні вугілля¹⁾

Важкий метал	Частка газоподібної фракції
Арсен (As)	0,005
Ртуть (Hg)	0,900
Селен (Se)	0,150
Інші	0

Ефективність уловлювання твердих частинок золоуловлювальною установкою $\eta_{\text{зр}}$ залежить від типу очисного обладнання, встановленого на енергетичній установці, наприклад електростатичного фільтра, рукавного фільтра, мокрого скрубера чи батарейного циклона.

Ефективність уловлювання газоподібних важких металів $\eta_{\text{гзу}}$ залежить від властивостей важкого металу, типу золоуловлювальної установки і наявності інших заходів очистки димових газів, таких, як сіркоочисні та азотоочисні установки. Ефективність повинна визначатися під час проведення випробувань установки. Значення ефективності уловлення газоподібної фракції важких металів $\eta_{\text{гзу}}$ в електрофільтрах наведено в табл. 6.1.5

Таблиця 6.1.5 — Ефективність уловлювання газоподібної фракції важкого металу золоуловлювальною установкою під час спалювання твердого палива¹⁾

Золоуловлювальна установка	Ефективність
Електростатичний фільтр	0,35
Інші	0

6.2 Спалювання мазуту

Під час спалювання в енергетичній установці мазуту утворюються сполуки важких металів, які є складовими мазутної золи. Сполуки ванадію відносяться до

основних складових мазутної золи. Тому кількість викиду ванадію прийнято за контрольний параметр шкідливої дії мазутної золи на довкілля.

Показник емісії мазутної золи k_v , г/ГДж, у перерахунку на ванадій є специфічним і розраховується за формулою

$$k_v = \frac{c_v}{Q_i^r} (1 - \eta_{oc}) (1 - \eta_{zy(v)}), \quad (6.2.1)$$

де Q_i^r – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг;

c_v – масовий вміст ванадію в паливі, мг/кг;

η_{oc} – частка ванадію, який осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву котла;

$\eta_{zy(v)}$ – ефективність уловлювання ванадію золоуловлювальною установкою.

Масовий вміст ванадію у мазуті c_v , мг/кг, визначається за результатами хімічного аналізу мазуту або розраховується за апроксимаційною формулою

$$c_v = 2222 A^r, \quad (6.2.2)$$

де A^r – масовий вміст золи в мазуті на робочу масу, %.

Масовий вміст золи в мазуті A^r визначається за даними технічного аналізу палива. Частка ванадію η_{oc} , яка осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву котлів, залежить від конструктивних особливостей котлів, наведено в таблиці 6.2.1.

Таблиця 6.2.1 — Значення частки ванадію, яка осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву котлів

Котел	Значення
З проміжними пароперегрівачами, очищення поверхонь яких провадиться під час зупинки	0,07
Без проміжних пароперегрівачів (за тих самих умов очищення)	0,05

Під час спільного спалювання твердого палива та мазуту в пиловугільному котлі ефективність очищення димових газів $\eta_{zy(V)}$ від мазутної золи (в перерахунку на ванадій) $\eta_{zy(V)}$ розраховується за емпіричною формулою

$$\eta_{zy(V)} = 1 - \frac{1 - \eta_{zy}}{f_v}, \quad (6.2.3)$$

де η_{zy} – ефективність очищення димових газів від твердих частинок згідно з пр.2;

f_v – емпіричний коефіцієнт, який враховує ефект “збагачення” ванадієм золи, яка виходить після золоуловлювальної установки, і залежить від типу золоуловлювальної установки 6.2.1.

Таблиця 6.2.1 — Значення емпіричного коефіцієнта f_v для розрахунку ефективності уловлювання ванадію золоуловлювальною установкою

Золоуловлювальна установка	Емпіричний коефіцієнт
Електростатичний фільтр	0,6
Мокрий скруббер	0,5
Батарейний циклон	0,4

Емпірична формула розрахунку ефективності очищення димових газів від мазутної золи (у перерахунку на ванадій) $\eta_{zy(V)}$ в газомазутних котлах батарейними циклонами, які спеціально застосовуються для цього, що діє в діапазоні значень ефективності пилоочищення циклону 0,65...0,85:

$$\eta_{zy(V)} = 3,1277\eta_{zy}^2 - 1,4948\eta_{zy} - 0,1412, \quad (6.2.4)$$

де $\eta_{zy(V)}$ – ефективність очищення димових газів від мазутної золи;

η_{zy} – ефективність очищення димових газів від твердих частинок (табл. 6.1.5).

Ефективність очищення димових газів від мазутної золи (в перерахунку на ванадій) $\eta_{zy(V)}$ в газомазутних котлах батарейними циклонами, які спеціально застосовуються для цього, визначається за емпіричною формулою (6.1.5).

Для розрахунку показника емісії k п'ятиоксиду ванадію V_2O_5 , г/ГДж, як забруднювальної речовини необхідно показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій помножити на відношення молекулярних мас п'ятиоксиду ванадію та ванадію:

$$k_{V_2O_5} = k_V \frac{\mu_{V_2O_5}}{2\mu_V} = k_V \frac{182}{2 \cdot 51} \cong 1,8k_V, \quad (6.2.5)$$

де k_V – показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій;

$\mu_{V_2O_5}$ – молекулярна маса п'ятиоксиду ванадію, яка дорівнює 182 кг/кмоль;

μ_V – молекулярна маса ванадію, яка дорівнює 51 кг/кмоль.

6.3 Спалювання природного газу

При спалюванні в енергетичній установці природного газу можуть виділятися в газоподібній формі в незначній кількості ртуть та її сполуки¹⁾.

Показник емісії ртуті k_{Hg} , г/ГДж, є узагальненим і розраховується за формулою

$$k_{Hg} = (k_{Hg})_0 (1 - \eta_{згз}), \quad (6.3.1)$$

де $(k_{Hg})_0$ – показник емісії ртуті без використання золоуловлювальної установки, г/ГДж;

$\eta_{згз}$ – ефективність уловлювання ртуті в золоуловлювальній установці (таблиця 6.3.1).

Таблиця 6.3.1 — Ефективність уловлювання газоподібної фракції важкого металу золоуловлювальною установкою під час спалювання твердого палива

Золоуловлювальна установка	Ефективність
Електростатичний фільтр	0,35
Інші	0

Значення $(k_{Hg})_0$ під час спалювання природного газу наведено в таблиці 6.3.2.

Таблиця 6.3.2 — Показник емісії важкого металу під час спалювання природного газу (без урахування золоуловлювальної установки)

Важкий метал	Показник емісії, г/ГДж
Ртуть (Hg)	$1 \cdot 10^{-4}$
Інші	0

ЗАДАЧА 7

Розрахувати валові викиди важких металів при спалюванні вугілля, мазуту та природного газу для умови Задачі 3

Розв'язання

Валовий викид важких металів при спалюванні вугілля

За даними таблиці А.2 додатка А вміст важких металів у робочій масі вугілля становить, мг/кг:

свинець (Pb) – 14;

ртуть (Hg) – 0,14;

хром (Cr) – 47;

нікель (Ni) – 26;

мідь (Cu) – 29;

цинк (Zn) – 40;

арсен (As) – 20.

При спалюванні вугілля показник емісії важкого металу визначається за формулою (6.1.1):

$$k_{\text{вм}} = \frac{c_{\text{вм}}}{Q_i^r} [a_{\text{вин}} f_{\text{зб}} (1 - \eta_{\text{зв}}) (1 - f_{\text{г}}) + f_{\text{г}} (1 - \eta_{\text{гзв}})], \text{ г/ГДж.}$$

З наявних у вугіллі важких металів ртуть і арсен частково виходять з палива в газоподібному вигляді. За даними таблиці 6.1.4 ця частка становить 0,9 (для Hg) і 0,005 (для As). Для решти важких металів вона дорівнює нулю. Ефективність уловлювання в золоуловлювальній установці газоподібної ртуті $\eta_{\text{зв}}$ дорівнює 0,35 (таблиця 6.1.5). За даними таблиці 6.1.3 при ефективності золоуловлювача 0,985

коефіцієнт збагачення важких металів становить: арсен – 5,07, хром – 1,0, мідь – 2,06, ртуть – 1,0, нікель – 2,85, свинець – 5,00, цинк – 5,93. Результати розрахунків зведено в таблицю 6.4.

Таблиця 6.4 – Розраховані значення викидів важких металів

Важкий метал	As	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Показник емісії, г/ГДж	0,075	0,027	0,044	0,004	0,043	0,041	174
Валовий викид, т	1,723	0,619	0,991	0,090	0,974	0,928	3,913

Валовий викид ванадію під час спалювання мазуту

Показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій розраховується за формулою (6.2.1):

$$k_v = \frac{c_v}{Q_i^r} (1 - \eta_{oc}) (1 - \eta_{zy(v)}) \text{ г/ГДж.}$$

Частка ванадію η_{oc} , який осідає з твердими частинками на поверхнях нагріву, для котла з проміжними пароперегрівачами, очищення поверхонь яких провадиться під час зупинки, становить 0,07. Емпіричний коефіцієнт f_v для електростатичних фільтрів становить 0,6 (таблиця 6.2.1). Ефективність уловлювання ванадію електрофільтром під час спільного спалювання вугілля та мазуту

$$\eta_{zy(v)} = 1 - \frac{1 - \eta_{zy}}{f_v} = 1 - \frac{1 - 0,985}{0,6} = 0,975 .$$

Показник емісії мазутної золи в перерахунку на ванадій

$$k_v = \frac{327,4}{39,48} (1 - 0,07) (1 - 0,975) = 0,19 \text{ г/ГДж.}$$

Тоді валовий викид ванадію:

$$E_v = 10^{-6} k_v Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 0,19 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 0,53 \text{ т.}$$

Показник емісії п'ятиоксиду ванадію за формулою (18)

$$k_{v_2O_5} = 1,8 k_v = 1,8 \cdot 0,19 = 0,34 \text{ г/ГДж.}$$

Валовий викид п'ятиоксиду ванадію:

$$E_{v_2O_5} = 10^{-6} k_{v_2O_5} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 0,34 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 0,95 \text{ т.}$$

Валовий викид ртуті при спалюванні природного газу

Валовий викид ртуті під час спалювання природного газу розраховується за даними таблиці 6.3.2 та формулою (6.3.1):

$$E_{\text{Hg}} = 10^{-6} k_{\text{Hg}} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 0,0001 \cdot 45,75 \cdot 61252 = 0,00028 \text{ T}.$$

Практичне заняття № 7. Розрахунок валових викидів оксиду діазоту та метану

7.1 Оксид діазоту N_2O

Оксид діазоту (або оксид азоту (I) N_2O) відноситься до парникових газів. За відсутності постійних вимірювань концентрації N_2O валовий викид оксиду діазоту визначається за формулою :

$$E_{N_2O} = 10^{-6} k_{N_2O} Q_i^r B, \text{ т} \quad (7.1.1)$$

де E_{N_2O} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{N_2O} – показник емісії забруднювальної речовини для використовуваного палива, г/ГДж;

B – витрата палива за проміжок часу P , т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Значення узагальненого показника емісії N_2O залежно від виду палива, потужності енергетичної установки та технології спалювання наведено в таблиці 7.1.1

Таблиця 7.1.1 —Показник емісії оксиду діазоту N_2O , г/ГДж

Технологія і паливо	Значення
Вугілля (факельне спалювання)	1,4
Вугілля (киплячий шар)	56
Вугілля (нерухомий шар)	1,4
Мазут	0,6
Природний газ	0,1
Камера згоряння газової турбіни	2,5

7.2 Метан CH_4

Метан CH_4 також відноситься до парникових газів. Утворення метану під час спалювання органічного палива в енергетичних установках дуже незначне. Воно пов'язане з неповним згорянням органічного палива і зменшується з

підвищенням температури згоряння та масштабу енергетичної установки. За відсутності прямих вимірювань валовий викид метану визначається за формулою (7.2.1).

$$E_{\text{CH}_4} = 10^{-6} k_{\text{CH}_4} Q_i^r B \quad (7.2.1)$$

де E_{CH_4} – валовий викид j -ї забруднювальної речовини під час спалювання i -го палива за проміжок часу P , т;

k_{CH_4} – показник емісії забруднювальної речовини для використовуваного палива, г/ГДж;

B – витрата палива за проміжок часу P , т;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг.

Значення узагальненого показника емісії метану залежно від виду палива наведено в таблиці 7.2.1

Таблиця 7.2.1 — Показник емісії метану CH_4 , г/ГДж

Паливо	Значення
Вугілля	1,0
Мазут	3,0
Природний газ	1,0

ЗАДАЧА 8

Розрахувати валові викиди оксидів діазоту та метану для умови Задачі 3

Розв'язання

Валовий викид оксиду діазоту при спалюванні вугілля

Валовий викид оксиду діазоту N_2O під час спалювання вугілля розраховується за даними таблиці 7.1.1 та формулою (7.1.1):

$$E_{\text{N}_2\text{O}} = 10^{-6} k_{\text{N}_2\text{O}} Q_i^r B = 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 31,4 \text{ Т.}$$

Валовий викид оксиду діазоту при спалюванні мазуту

Валовий викид оксиду діазоту N_2O під час спалювання мазуту розраховується за даними таблиці 7.1.1 та формулою (7.1.1):

$$E_{N_2O} = 10^{-6} k_{N_2O} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 0,6 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 1,68 \text{ Т.}$$

Валовий викид оксиду діазоту при спалюванні природного газу

Валовий викид оксиду діазоту N_2O при спалюванні природного газу розраховується за даними таблиці 7.1.1 та формулою (7.1.1):

$$E_{N_2O} = 10^{-6} k_{N_2O} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 0,1 \cdot 45,75 \cdot 61252 = 0,28 \text{ Т.}$$

Валовий викид метану при спалюванні вугілля

Валовий викид метану CH_4 під час спалювання вугілля розраховується за даними таблиці 7.2.1 та формулою (7.2.1):

$$E_{CH_4} = 10^{-6} k_{CH_4} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 20,47 \cdot 1096363 = 22,4 \text{ Т.}$$

Валовий викид метану при спалюванні мазуту

Валовий викид метану CH_4 під час спалювання мазуту розраховується за даними таблиці 7.2.1 та формулою (7.2.1):

$$E_{CH_4} = 10^{-6} k_{CH_4} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 3,0 \cdot 39,48 \cdot 70945 = 8,41 \text{ Т.}$$

Валовий викид метану при спалюванні природного газу

Валовий викид метану CH_4 під час спалювання природного газу розраховується за даними таблиці 7.2.1 та формулою (7.2.1):

$$E_{CH_4} = 10^{-6} k_{CH_4} Q_i' B = 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 45,75 \cdot 61252 = 2,80 \text{ Т.}$$

В таблиці 7.3 наведено значення викидів всього розглянутого спектру забруднювальних речовин щодо кожного палива та загалом.

Таблиця 7.3. — Валові викиди, т, забруднювальних речовин

Викид	Вугілля	Мазут	Природний газ	Всього
SO ₂	59 393	3 297	0	62 690
NO _x	2 604	254	191	3 049
CO	256	42	48	346
CO ₂	2 096 657	215 455	164 635	2 476 747
Тверді частинки	3366	1,60	0	3367,6
Pb	0,921	0	0	0,921

Hg	0,090	0	0,00028	0,09028
Cr	0,619	0	0	0,619
Ni	0,974	0	0	0,974
Cu	0,991	0	0	0,991
Zn	3,913	0	0	3,913
As	1,723	0	0	1,723
V ₂ O ₅	0	0,95	0	0,95
N ₂ O	31,40	1,68	0,28	33,36
CH ₄	22,40	8,42	2,80	33,62
Витрата палива, (т у.п.)	765 957,4	95 739,4	95 697,2	957 394,0

Практичне заняття № 8. Перерахунок характеристик газоподібного палива

Для газоподібного палива, як правило, відомі його об'ємні характеристики:

- склад – метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}) та більш важкі вуглеводні, азот (N_2), сірководень (H_2S), оксид (CO) і діоксид (CO_2) вуглецю;

- теплота згоряння;

- об'ємна витрата;

- об'єм використаного палива за певний проміжок часу.

Для газоподібного палива об'ємні характеристики необхідно перерахувати в масові.

Питома маса кожного індивідуального газу в сухому стані газоподібного палива визначається за формулами:

$$m_{\text{CH}_4} = 0,716 \cdot 0,01(\text{CH}_4)_{\text{v}}, \quad (8.1)$$

$$m_{\text{C}_2\text{H}_6} = 1,342 \cdot 0,01(\text{C}_2\text{H}_6)_{\text{v}}, \quad (8.2)$$

$$m_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1,967 \cdot 0,01(\text{C}_3\text{H}_8)_{\text{v}}, \quad (8.3)$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 2,593 \cdot 0,01(\text{C}_4\text{H}_{10})_{\text{v}}, \quad (8.4)$$

$$m_{\text{C}_5\text{H}_{12}} = 3,219 \cdot 0,01(\text{C}_5\text{H}_{12})_{\text{v}}, \quad (8.5)$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_6} = 3,492 \cdot 0,01(\text{C}_6\text{H}_6)_{\text{v}}, \quad (8.6)$$

$$m_{\text{N}_2} = 1,250 \cdot 0,01(\text{N}_2)_{\text{v}}, \quad (8.7)$$

$$m_{\text{H}_2\text{S}} = 1,521 \cdot 0,01(\text{H}_2\text{S})_{\text{v}}, \quad (8.8)$$

$$m_{\text{CO}} = 1,250 \cdot 0,01(\text{CO})_{\text{v}}, \quad (8.9)$$

$$m_{\text{CO}_2} = 1,964 \cdot 0,01(\text{CO}_2)_{\text{v}}, \quad (8.10)$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм^3 сухого палива, кг/нм^3 ;

$(i)_{\text{v}}$ – об'ємний вміст i -го індивідуального газу, %.

Густина сухого газоподібного палива $\rho_{\text{н}}$, кг/нм³, при нормальних умовах визначається як сума питомих мас індивідуальних газів, що входять до складу палива,

$$\rho_{\text{н}} = \sum m_{\text{C}_p\text{H}_q} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{H}_2\text{S}} + m_{\text{CO}} + m_{\text{CO}_2}, \quad (8.11)$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм³ сухого палива при нормальних умовах, кг/нм³;

$m_{\text{C}_p\text{H}_q}$ – питома маса вуглеводню C_pH_q , який складається з p атомів вуглецю та q атомів водню при нормальних умовах, кг/нм³.

Масовий елементний склад сухого газоподібного палива визначається за формулами:

$$\text{C}^{daf} = \frac{100}{\rho_{\text{н}}} \left(\sum \frac{12p}{12p+q} m_{\text{C}_p\text{H}_q} + 0,429m_{\text{CO}} + 0,273m_{\text{CO}_2} \right), \quad (8.12)$$

$$\text{H}^{daf} = \frac{100}{\rho_{\text{н}}} \left(\sum \frac{q}{12p+q} m_{\text{C}_p\text{H}_q} + 0,059m_{\text{H}_2\text{S}} \right), \quad (8.13)$$

$$\text{N}^{daf} = \frac{100}{\rho_{\text{н}}} m_{\text{N}_2}, \quad (8.14)$$

$$\text{S}^{daf} = \frac{100}{\rho_{\text{н}}} (0,941m_{\text{H}_2\text{S}}), \quad (8.15)$$

$$\text{O}^{daf} = \frac{100}{\rho_{\text{н}}} (0,571m_{\text{CO}} + 0,727m_{\text{CO}_2}), \quad (8.16)$$

де C^{daf} – масовий вміст вуглецю в паливі на горючу масу, %;

H^{daf} – масовий вміст водню в паливі на горючу масу, %;

N^{daf} – масовий вміст азоту в паливі на горючу масу, %;

S^{daf} – масовий вміст сірки в паливі на горючу масу, %;

O^{daf} – масовий вміст кисню в паливі на горючу масу, %;

$\rho_{\text{н}}$ – густина сухого газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³;

m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм³ сухого газоподібного палива, кг/нм³.

Для перерахунку об'ємної витрати газоподібного палива в масову використовують формулу

$$b = b_v \rho_n, \quad (8.17)$$

де b – масова витрата газоподібного палива, кг/с;

b_v – об'ємна витрата газоподібного палива при нормальних умовах, нм³/с;

ρ_n – густина газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³.

Маса використаного газоподібного палива B , т, за проміжок часу P та масова теплота згоряння розраховуються за формулами:

$$B = B_v \rho_n, \quad (8.18)$$

$$Q_i^r = Q_{iv}^r / \rho_n, \quad (8.19)$$

де B_v – об'єм використаного газоподібного палива за проміжок часу P при нормальних умовах, тис. нм³;

Q_i^r – масова нижча теплота згоряння газоподібного палива, МДж/кг;

Q_{iv}^r – об'ємна нижча теплота згоряння газоподібного палива при нормальних умовах, МДж/нм³;

ρ_n – густина газоподібного палива при нормальних умовах, кг/нм³.

Практичне заняття № 9. Визначення об'єму сухих димових газів

Питомий об'єм сухих димових газів, які утворюються під час повного згоряння палива, визначається на підставі даних про масовий елементний склад робочої маси палива та витрати повітря для його спалювання відповідно до стехіометричних співвідношень між паливом та повітрям.

Під час спалювання палива можливе його неповне згоряння, у першу чергу механічний недопал, внаслідок чого до викидів твердих частинок та шлаку потрапляють горючі речовини, головним чином вуглець.

Масовий вміст вуглецю $C^{взг}$, який згоряє, % на робочу масу, виражається через масовий вміст вуглецю в паливі C^r за формулою

$$C^{взг} = \varepsilon_C C^r, \quad (9.1)$$

де ε_C – ступінь окислення вуглецю палива;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %.

Ефективність процесу горіння визначає ступінь окислення вуглецю палива ε_C . При повному згорянні палива ступінь окислення дорівнює одиниці, але за наявності недогоряння палива його значення зменшується. Ступінь окислення вуглецю палива ε_C в енергетичній установці розраховується за формулою

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{A^r}{C^r} \left(a_{вин} \frac{\Gamma_{вин}}{100 - \Gamma_{вин}} + (1 - a_{вин}) \frac{\Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} \right), \quad (9.2)$$

де A^r – масовий вміст золи в паливі на робочу масу, %;

C^r – масовий вміст вуглецю в паливі на робочу масу, %;

$a_{вин}$ – частка золи, яка видаляється у вигляді леткої золи;

$\Gamma_{вин}$ – масовий вміст горючих речовин у виносі твердих частинок, %;

$\Gamma_{шл}$ – масовий вміст горючих речовин у шлаку, %.

Для природного газу рекомендоване значення ε_C становить 0,995, для мазуту – 0,99.

Вміст золи A^r в паливі та горючих речовин у шлаку $\Gamma_{шл}$ і викидах твердих частинок $\Gamma_{вин}$ визначається технічним аналізом палива (ГОСТ 27313—95), а також

шлаку та твердих частинок, які виходять з енергетичної установки. Частка золи $a_{\text{вин}}$, яка виноситься з енергетичної установки у вигляді леткої золи, залежить від технології спалювання палива. Вона визначається для енергетичної установки за паспортними даними та при проведенні її випробувань. За відсутності такої інформації значення $a_{\text{вин}}$ визначаються за даними таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 — Частка леткої золи $a_{\text{вин}}$ при різних технологіях спалювання палива

Котел	Вугілля	Мазут
З твердим (сухим) шлаковидаленням	0,95	1,00
Відкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,80	1,00
Напіввідкрита топка з рідким шлаковидаленням	0,70	1,00
Двокамерна топка:	0,55	1,00
з вертикальним передтопком	0,30	1,00
горизонтальна циклонна	0,15	1,00
З циркулюючим киплячим шаром	0,50	—
З бульбашковим киплячим шаром	0,20	—
З нерухомим шаром	0,15	—

Під час спалювання 1 кг робочої маси палива з урахуванням механічного недопалювання питомий об'єм сухих димових газів $v_{\text{дг}}^{\circ}$, $\text{нм}^3/\text{кг}$ (за відсутності в них кисню) визначається за формулою¹⁾.

$$v_{\text{дг}}^{\circ} = 0,01(1,866C^{\text{взг}} + 0,7S^{\text{r}} + 0,8N^{\text{r}}) + v_{\text{N}_2\text{пов}}, \quad (9.3)$$

де $C^{\text{взг}}$ — масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

S^{r} — масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

N^{r} — масовий вміст азоту в паливі на робочу масу, %;

$v_{\text{N}_2\text{пов}}$ — питомий об'єм азоту повітря, необхідного для горіння палива,

$\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм азоту $v_{N_2\text{пов}}$, $\text{нм}^3/\text{кг}$, в повітрі, яке необхідне для спалювання палива, визначається за формулою

$$v_{N_2\text{пов}} = 3,762 v_{O_2}, \quad (9.4)$$

де v_{O_2} – питомий об'єм кисню, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питомий об'єм кисню v_{O_2} , $\text{нм}^3/\text{кг}$, необхідного для проходження стехіометричних реакцій окислення,

$$v_{O_2} = 0,01(1,866C^{\text{взг}} + 5,56H^r + 0,7S^r - 0,7O^r), \quad (9.5)$$

де $C^{\text{взг}}$ – масовий вміст вуглецю палива, що згорів, на робочу масу, %;

H^r – масовий вміст водню в паливі на робочу масу, %;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

O^r – масовий вміст кисню в паливі на робочу масу, %.

Константи в рівняннях (8.3) – (8.5) є стереометричними множниками.

Густина сухих димових газів $\rho_{\text{дг}}^{\circ}$ визначається як відношення питомої маси сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$ до питомого об'єму сухих димових газів $v_{\text{дг}}^{\circ}$ (під час спалювання 1 кг робочої маси палива). Питома маса сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$ визначається за відсутності в них кисню та водяної пари, яка утворилася в результаті випарювання вологи палива та окислення водню.

Густина сухих димових газів $\rho_{\text{дг}}^{\circ}$, $\text{кг}/\text{нм}^3$, визначається за формулою

$$\rho_{\text{дг}}^{\circ} = m_{\text{дг}}^{\circ} / v_{\text{дг}}^{\circ}, \quad (9.6)$$

де $m_{\text{дг}}^{\circ}$ – питома маса сухих димових газів, $\text{кг}/\text{кг}$;

$v_{\text{дг}}^{\circ}$ – питомий об'єм сухих димових газів, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Питома маса сухих димових газів $m_{\text{дг}}^{\circ}$, $\text{кг}/\text{кг}$, вираховується за формулою

$$m_{\text{дг}}^{\circ} = 0,01(3,664C^{\text{взг}} + 1,000N^r + 2,001S^r) + 4,702v_{O_2}, \quad (9.7)$$

де $C^{\text{взг}}$ – масовий вміст вуглецю палива, що згоряє, на робочу масу, %;

N^r – масовий вміст азоту в паливі на робочу масу, %;

S^r – масовий вміст сірки в паливі на робочу масу, %;

v_{O_2} – питомий об'єм кисню, необхідного для проходження
техіометричних реакцій окислення, $\text{нм}^3/\text{кг}$.

Одержане значення $v_{\text{дг}}^o$ за відсутності кисню в димових газах (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1$) може бути приведене до стандартного вмісту кисню в димових газах, наприклад, до 6 %, за допомогою рівняння

$$v_{\text{дг}} = v_{\text{дг}}^o \frac{21}{21 - O_{2\text{ст}}} = v_{\text{дг}}^o \frac{21}{21 - 6} = 1,4 v_{\text{дг}}^o, \quad (9.8)$$

де $v_{\text{дг}}$ – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до стандартного вмісту кисню в димових газах, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

$v_{\text{дг}}^o$ – питомий об'єм сухих димових газів при $O_2 = 0$ %, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

$O_{2\text{ст}}$ – стандартний об'ємний вміст кисню в сухих димових газах, %.

Перерахунок значення виміряної концентрації в показник емісії j -ї забруднювальної речовини для конкретного джерела викиду здійснюється за формулою

$$k_j = c'_j v_{\text{дг}} / Q_i^r, \quad (9.9)$$

де k_j – показник емісії j -ї забруднювальної речовини, $\text{г}/\text{ГДж}$;

c'_j – виміряна масова концентрація j -ї забруднювальної речовини в сухих димових газах, приведена до нормальних умов та стандартного вмісту кисню, $\text{мг}/\text{нм}^3$;

$v_{\text{дг}}$ – питомий об'єм сухих димових газів, приведений до стандартного вмісту кисню, $\text{нм}^3/\text{кг}$;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, $\text{МДж}/\text{кг}$.

ЗАДАЧА 9

Перерахувати характеристики природного газу

Розв'язок

Перерахунок характеристик природного газу

Питома маса кожного індивідуального газу в сухому паливі визначається за формулами:

$$\begin{aligned}m_{\text{CH}_4} &= 0,716 \cdot 0,01(\text{CH}_4)_v = 0,716 \cdot 0,01 \cdot 98,90 = 0,7081 , \\m_{\text{C}_2\text{H}_6} &= 1,342 \cdot 0,01(\text{C}_2\text{H}_6)_v = 1,342 \cdot 0,01 \cdot 0,12 = 0,0016 , \\m_{\text{C}_3\text{H}_8} &= 1,967 \cdot 0,01(\text{C}_3\text{H}_8)_v = 1,967 \cdot 0,01 \cdot 0,011 = 0,0002 , \\m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} &= 2,593 \cdot 0,01(\text{C}_4\text{H}_{10})_v = 2,593 \cdot 0,01 \cdot 0,01 = 0,0003 , \\m_{\text{N}_2} &= 1,250 \cdot 0,01(\text{N}_2)_v = 1,250 \cdot 0,01 \cdot 0,90 = 0,0113 , \\m_{\text{CO}_2} &= 1,964 \cdot 0,01(\text{CO}_2)_v = 1,964 \cdot 0,01 \cdot 0,06 = 0,0012 ,\end{aligned}$$

де m_i – питома маса i -го індивідуального газу в 1 нм^3 сухого газоподібного палива, кг/нм^3 ;

$(i)_v$ – об'ємний вміст i -го індивідуального газу, %.

Масовий елементний склад сухого газоподібного палива визначається за формулами

$$\begin{aligned}C^{daf} &= \frac{100}{\rho_{\Pi}} \left(\sum \frac{12p}{12p+q} m_{\text{C}_p\text{H}_q} + 0,429 m_{\text{CO}} + 0,273 m_{\text{CO}_2} \right), \\C^{daf} &= \frac{100}{0,723} (0,749 \cdot 0,7081 + 0,799 \cdot 0,0016 + 0,817 \cdot 0,0002 + 0,827 \cdot 0,0003 + 0,273 \cdot 0,0012) = 73,67, \\H^{daf} &= \frac{100}{\rho_{\Pi}} \left(\sum \frac{q}{12p+q} m_{\text{C}_p\text{H}_q} + 0,059 m_{\text{H}_2\text{S}} \right), \\H^{daf} &= \frac{100}{0,723} (0,251 \cdot 0,7081 + 0,201 \cdot 0,0016 + 0,183 \cdot 0,0002 + 0,173 \cdot 0,0003) = 24,65 , \\N^{daf} &= \frac{100}{\rho_{\Pi}} m_{\text{N}_2} = \frac{100}{0,723} 0,0113 = 1,56 , \\O^{daf} &= \frac{100}{\rho_{\Pi}} (0,571 m_{\text{CO}} + 0,727 m_{\text{CO}_2}) = \frac{100}{0,723} 0,727 \cdot 0,0012 = 0,12 ,\end{aligned}$$

де C^{daf} – масовий вміст вуглецю в паливі на горючу масу, %;

H^{daf} – масовий вміст водню в паливі на горючу масу, %;

N^{daf} – масовий вміст азоту в паливі на горючу масу, %;

O^{daf} – масовий вміст кисню в паливі на горючу масу, %;

ρ_n – густина сухого газоподібного палива, кг/м³.

Таким чином, отримано значення, % масового елементного складу природного газу:

$$\text{вуглець} - C^r = C^{daf} = 73,67;$$

$$\text{водень} - H^r = H^{daf} = 24,65;$$

$$\text{кисень} - O^r = O^{daf} = 0,12;$$

$$\text{азот} - N^r = N^{daf} = 1,56.$$

Масова нижча теплота згоряння Q_i^r

$$Q_i^r = Q_i^{daf} = Q_{iv}^{daf} / \rho_n = 33,08 / 0,723 = 45,75 \text{ МДж/кг.}$$

Масова витрата природного газу

$$B = B_v \rho_n = 84\,762 \cdot 10^3 \cdot 0,723 = 61\,252 \text{ т.}$$

Список літератури

- 1 ГДК 34.02.305-2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. – К., 2002.
- 2 Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / Под ред. Т.А. Зикеева. – М.: Энергия, 1968.
- 3 Справочник по содержанию малых элементов в товарной продукции угледобывающих и углеобогачительных предприятий Донецкого бассейна. – Днепропетровск, 1994. – 187 с.
- 4 Какарека С.В., Хомич В.С. и др. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: Опыт оценки удельных показателей. – Минск: Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 1998. – 156 с.
- 5 Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 184 с.
- 6 Тепловые и атомные электрические станции: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 624 с.
- 7 Питомі показники викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від основних виробництв промисловості та сільського господарства. – К.: Мінекоресурсів України, 2001.
- 8 Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
- 9 Викиди парникових газів. Підприємства Міненерго України. 1990 та 1999 роки. Ініціатива з питань зміни клімату, 2000. – 62 с.

ДОДАТОК А

Склад і характеристики різних видів органічного палива

Тверде паливо

В таблиці А.1 наведено орієнтовний елементний склад палива на горючу масу для найбільш поширених марок вугілля. Масовий елементний склад палива на робочу масу та нижча робоча теплота згоряння визначаються за даними таблиці А.1.

Таблиця А.1 — Елементний склад вугілля (масовий вміст на горючу масу)¹¹⁾

Вугілля	C _{daf} , %	H _{daf} , %	S _{daf} , %	O _{daf} , %	N _{daf} , %	V _{daf} , %	Q_i^{daf} , МДж/кг
Антрацитовий штиб АШ	93,5	1,8	2,4	1,5	0,8	4,0	33.24
Пісне вугілля ТР	89,0	4,2	3,3	2,1	1,5	12,0	34.29
Донецьке газове ГР	81,0	5,4	4,4	7,7	1,5	40,0	31.98
Донецьке довгополумєневе ДР	75,5	5,5	4,3	13,1	1,6	43,0	30.56
Львівсько-волинське (ЛВ) ГР	79,5	5,2	3,7	10,3	1,3	39,0	31.69
Олександрійське буре Б1Р	67,5	5,8	5,9	19,9	0,9	58,5	26.96

У таблиці АГ.2 наведено інформацію про орієнтовний вміст основних важких металів у робочій масі вугілля родовищ України ²⁾³⁾.

Таблиця А.2 — Вміст важких металів $c_{\text{вм}}$ у енергетичному вугіллі, мг/кг

Вугілля	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Антрацитовий штиб АШ	20	0	47	29	0.28	26	20	0	40
Донецьке пісне ТР	20	0	47	29	0.20	26	18	0	40
Донецьке ГР	20	0	47	29	0.14	26	14	0	40
Донецьке довгополумєневе ДР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Львівсько-Волинське (ЛВ) ГР	20	0	47	29	0.16	26	16	0	40
Олександрійське буре Б1Р	20	0	47	29	0.16	26	14	0	40

¹ Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / Под ред. Т.А. Зикеева. – М.: Энергия, 1968

² Справочник по содержанию малых элементов в товарной продукции угледобывающих и углеобогащательных предприятий Донецкого бассейна. – Днепропетровск, 1994. – 187 с.

³ Какарека С.В., Хомич В.С. и др. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: Опыт оценки удельных показателей – Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси. 1998. - 156 с.

Мазут

У таблиці А.3 наведено орієнтовні дані характеристик основних марок мазуту, які використовуються в енергетиці¹⁾.

Таблиця А.3 — Склад енергетичних мазутів

Показники	Марка мазуту				
	високосірчистого			малосірчистого	
	40	100	200	40	100
Середні:					
$S^{daf}, \%$	2,50	2,70	3,00	0,40	0,40
$C^{daf}, \%$	85,50	85,70	85,90	87,50	87,50
$H^{daf}, \%$	11,20	10,60	10,20	11,50	11,10
$(O + N)^{daf}, \%$	0,80	1,00	0,90	0,60	1,00
$Q^{daf}, \text{МДж/кг}$	40,40	40,03	39,77	41,24	40,82
Граничні:					
$A^d, \%$	0,15	0,15	0,30	0,15	0,15
Мазутна зола (V_2O_5), мг/кг	600	600	1200	600	600
$W^r, \%$	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00

Природний газ

У таблиці А.4 наведено орієнтовний склад (об'ємні частки в сухому газі, %), теплоту згоряння та густину природного газу, який постачається з двох газопроводів: Уренгой – Ужгород та Середня Азія – Центр¹⁾.

Таблиця А.4 — Характеристики природного газу для різних газопроводів

Газопровід	CH_4 , %	C_2H_6 , %	C_3H_8 , %	C_4H_{10} , %	C_5H_{12} , %	CO_2 , %	N_2 , %	H_2S , %	Q_i^d , МДж/нм ³	ρ_n , кг/нм ³
Уренгой— Ужгород	98.9 0	0.12	0.01 1	0.01	0.00	0.06	0.90	0.00	33.08	0.723
Середня Азія—Центр	94.2 9	2.80	0.73	0.15	0.03	1.00	1.00	0.00	34.21	0.764

¹ Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, мазут и горючий природный газ):
Справочник / В.С. Вдовченко, М.И. Мартынова, Н.В. Новицкий, Г.Д. Юшина. – М.: Энергоатомиздат, 1991- 184 с.